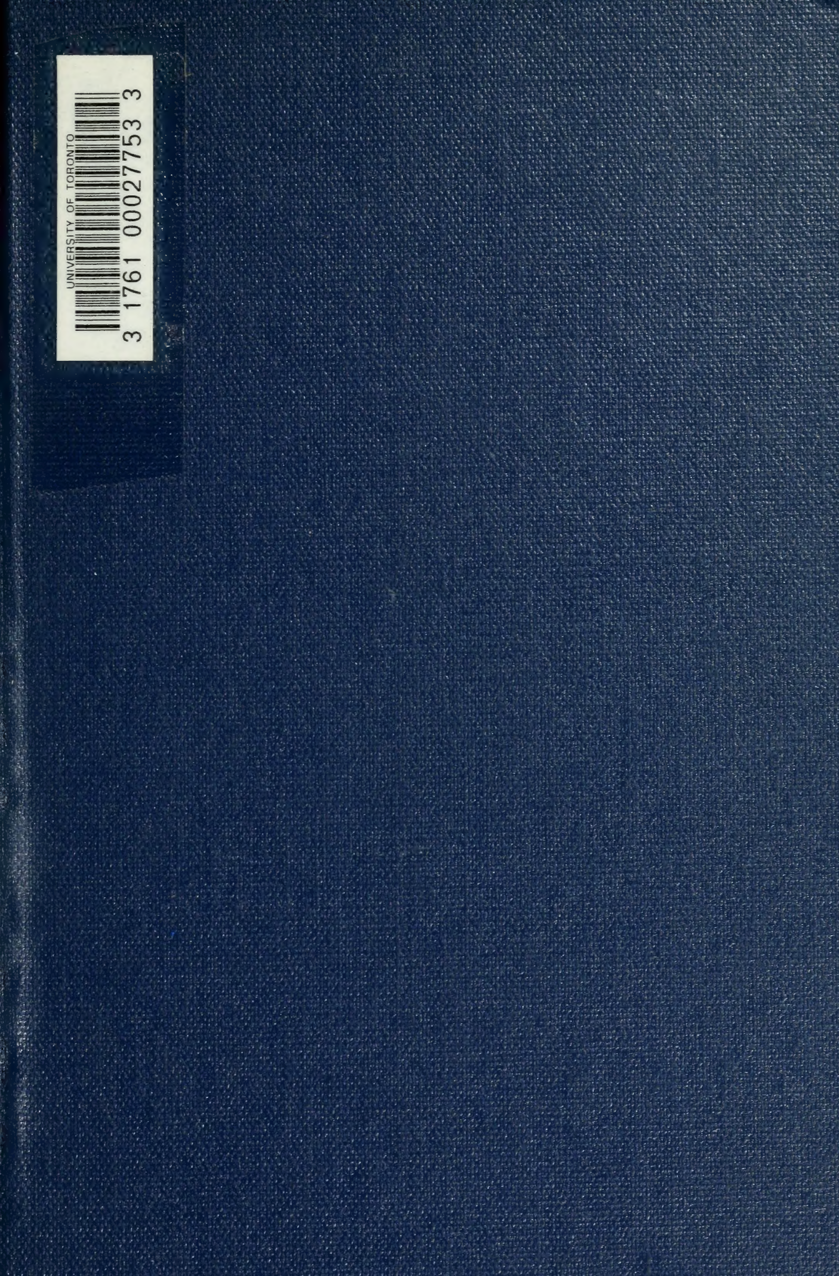

UNIVERSITY OF TORONTO
3 1761 00027753 3

I

36

Die Elektrizität

und ihre Anwendungen.

DIE

ELEKTRIZITÄT

UND

IHRE ANWENDUNGEN.

VON

DR. L. GRAETZ,
O. Ö. PROFESSOR AN DER UNIVERSITÄT MÜNCHEN.

MIT 667 ABBILDUNGEN.

SECHZEHNTE AUFLAGE.
(67. bis 76. Tausend.)

STUTTGART.
VERLAG VON J. ENGELHORNS NACHF.
1912.

Druck der Union Deutsche Verlagsgesellschaft in Stuttgart.

Vorwort zur sechzehnten Auflage.

Erfreulicherweise ist das Gebiet der Elektrizität, sowohl in wissenschaftlicher Hinsicht, wie in Bezug auf die technischen Anwendungen, noch immer in äußerst lebhafter Bewegung begriffen und noch weit entfernt von Ruhe und Erstarrung. Daher enthält auch die neue Auflage dieses Werkes, die der früheren nach zweijähriger Frist folgt, an sehr vielen Stellen neue oder geänderte Darstellungen; vieles, was bisher nur kurz behandelt war, wurde, den neuen Fortschritten entsprechend, ausführlicher behandelt, manches, was sich überlebt hat, wurde fortgelassen, so daß das Werk wieder, wie ich hoffe, dem neuesten Standpunkt der Wissenschaft und Technik gerecht wird. Von den vielen neu eingeführten Gegenständen seien hier einige kurz angeführt: Die Starkstrominfluenzmaschine, die Tauchelektroden, der Rotaxunterbrecher, die Anodenstrahlen, der Härtemesser für Röntgenstrahlen, die Rubidiumzellen, das elektrische Elementarquantum, eine ausführliche Darstellung der Eigenschaften von Gasionen, das Mesothorium, die Reichweite der α-Strahlen und ihre spezifische Ladung mit den Folgerungen auf ihre Natur als Heliumionen; ferner bei den Anwendungen: die neue Form des Edisonakkumulators, das Webersche Photometer, die Timar-Dregerlampe, das Moorelicht, die Gesetze der Licht- und Wärmestrahlung mit ihren Folgerungen auf die Ökonomie der Glühlampen, die neuen

Wolframlampen, der Stiazähler, die Elektrohängebahnen, das elektrische Pflügen, die Kornsche Telautographie, das Zentralbatteriesystem, eine ausführliche Darstellung des Strowgerschen automatischen Systems, eine geänderte Darstellung des Systems der tönenden Funken in der drahtlosen Telegraphie und vieles andere mehr.

Bei den Korrekturen wurde der Verfasser wiederum von Herrn Prof. Dr. K. Stöckl in Passau auf das sorgfältigste und eifrigste unterstützt, wofür er demselben auch hier seinen besten Dank ausspricht.

Der Verfasser hofft, daß das Werk, welches auch in der Ausstattung mit Abbildungen wieder wesentliche Verbesserungen und Bereicherungen aufweist, die alten Freunde sich erhalten und neue dazu erwerben möge.

München, November 1911.

Inhaltsverzeichnis.

II. Teil.

Die Anwendungen der Elektrizität . . . . S. 375—712

Einleitung.

Das einzige Gebiet der Physik, welches nur durch eine große Reihe schwieriger Untersuchungen überhaupt bekannt werden konnte, ist das Gebiet der Elektrizität. Für alle anderen Naturerscheinungen, die reinen Bewegungen, den Schall, das Licht, die Wärme haben wir von der Natur selbst schon die einfachsten Hilfsmittel zu ihrer Erforschung mitbekommen, unsere Sinne; wir fühlen, wir sehen, wir hören sie. Wenn auch die Sinne oft uns täuschen, und wenn wir auch zu einer sicheren, gründlichen Kenntnis dieser Erscheinungen uns nicht auf die direkten Angaben unserer Sinne verlassen dürfen, so haben wir durch sie doch wenigstens den Vorteil, daß sie uns in vielen Fällen unmittelbar angeben, ob Erscheinungen vorhanden sind oder nicht. Dieses wichtige Hilfsmittel für die Erforschung der Natur geht uns bei der Elektrizität vollständig ab. Wir haben leider keinen elektrischen Sinn. Zum Glück aber hat die Elektrizität unter anderen die höchst willkommene Eigenschaft, daß sie sich leicht und fast ohne unser Zutun in andere Erscheinungsformen verwandelt. Dadurch erst wird diese Kraft, welche die größte Rolle in der Natur spielt, unseren Sinnen zugänglich. Statt eigener Sinnesorgane wenden wir andere Hilfsmittel, Apparate, an, welche uns nicht nur das Vorhandensein der Elektrizität anzeigen, sondern uns auch ihre quantitativen Verhältnisse, ihre größere und geringere Menge, Dichtigkeit, Spannung u. s. w. zu messen gestatten. Die leichte Umwandlungsfähigkeit der Elektrizität erlaubt uns eben, derartige Apparate zu konstruieren, durch welche wir die Elektrizität zu erkennen und zu erforschen in den Stand gesetzt sind.

Durch derartige Methoden und Untersuchungen aber hat sich allmählich gezeigt, daß das Gebiet der Elektrizität das umfassendste

in der Natur ist, daß die Elektrizität mit fast allen anderen Naturerscheinungen, dem Licht, der Wärme, den chemischen Vorgängen in einem sehr engen Zusammenhang steht, in einem so engen Zusammenhang, daß wir jetzt sogar das Licht, obwohl es scheinbar ganz anderer Natur ist, als eine elektrische Erscheinung auffassen müssen.

Diese ungemein vielseitige Verknüpfung der Elektrizität mit den anderen physikalischen und chemischen Vorgängen war auch der Grund, warum man lange sich keine stichhaltige, begründete und insbesondere widerspruchslose Vorstellung davon machen konnte, was eigentlich Elektrizität ist. Man sah zwar deutlich, daß viele elektrische Erscheinungen sich in dem Lichtäther abspielen, in welchem, wie in einem großen Ozean, wir alle leben, so daß man sie als Vorgänge in dem Äther betrachten mußte, aber man sah auch, daß man es im Gebiete der Elektrizität nicht bloß mit den Bewegungen und Zuständen des Äthers zu tun hat, sondern daß auch die körperliche Materie, die Moleküle und Atome derselben dabei mitwirken. Und gerade diese Doppelbeziehungen machten es schwierig, ein vollkommenes Bild, eine Erklärung für die elektrischen Erscheinungen zu ersinnen. Manche Eigenschaften der Elektrizität z. B. sind sehr analog denen eines Stromes, so daß man ganz zweckmäßig von einem elektrischen Strom sprechen kann, andere aber, z. B. die magnetischen Wirkungen in der Umgebung eines Stroms, wieder nicht. Diese verhalten sich vielmehr wie Vorgänge im Äther. Es ist ein großer Fortschritt, daß wir jetzt mit Sicherheit trennen können, welche von den elektrischen Erscheinungen Äthervorgänge und welche materielle Vorgänge sind. Die Vorstellung, welche jetzt im Vordergrund der wissenschaftlichen Betrachtung steht, und welche in der Tat Klarheit in viele sonst unverständliche Erscheinungen bringt, ist die, daß die Elektrizität selbst eine Art Materie ist, die wie die anderen Stoffe, in kleinste Teilchen, Elektronen genannt, geteilt ist, daß aber diese Elektronen in einer engen Verknüpfung mit dem Äther stehen, so daß jede Bewegung eines Elektrons auch eine Bewegung im Äther zur Folge hat und umgekehrt. Wie weit es bisher möglich ist, durch diese Anschauung die elektrischen Erscheinungen verständlich zu machen, ist an geeigneten Stellen in dem Werke dargelegt.

Historisch hat sich unsere Kenntnis der elektrischen Erscheinungen so entwickelt, daß lange Jahrhunderte hindurch die Erscheinungen der Reibungselektrizität allein bekannt waren, daß man nur durch

Reibung Elektrizität erzeugen und die Erscheinungen verfolgen konnte, welche die Elektrizität im Gleichgewicht zeigt. Erst als am Ende des achtzehnten Jahrhunderts, im Jahre der französischen Revolution 1789, Galvani, oder, wie eine Erzählung behauptet, eigentlich seine Frau, ganz zufällig eine elektrische Wirkung beobachtete, bei der jede durch Reibung erzeugte Elektrizität ausgeschlossen war, erst seit dieser Zeit lernte man in den chemischen Prozessen eine Quelle kennen, die in unvergleichlich größeren Mengen Elektrizität liefert, als man durch Reibung erzeugen kann, und die durch ihre besondere Erscheinungsform sofort die Kenntnisse von den Eigenschaften und Wirkungen der Elektrizität um ein Bedeutendes erweiterte. Von dieser Zeit an fand ein stetiger ungehemmter Fortschritt in der Untersuchung der Elektrizität und ihrer Wirkungen statt. Eine glänzende Reihe von Namen hervorragender Männer bezeichnet den Fortschritt der Elektrizitätslehre. Durch ihren Scharfsinn und ihre Experimentierkunst brachten Männer wie Faraday, Ampère, Weber, Ohm, Joule, Davy, Oerstedt, Helmholtz, Maxwell, Hertz, J. J. Thomson, Lorentz die Kenntnis der elektrischen Erscheinungen zu einer ungeahnten Höhe. Faraday insbesondere war es, der durch die großartigsten Entdeckungen, durch die originellsten Methoden, durch die scharfsinnigsten Untersuchungen nicht nur die breite Grundlage legte zu dem großen Bau, den die Elektrizitätslehre heute einnimmt, sondern der einen großen Teil dieses Baues selbst hoch in die Höhe führte, und Heinrich Hertz war es, der, trotzdem ein neidisches Geschick ihm nur eine sehr kurze Lebenszeit gab, diesen Bau noch ein großes Stück über Faraday hinaus förderte.

Diejenigen Zweige der elektrischen Erscheinungen, welche für die riesig entwickelte moderne Elektrotechnik die Grundlage bilden, die Induktionserscheinungen, gerade diese entdeckt und erforscht zu haben ist Faradays zweifelloses und ungeschmälertes Verdienst. Immer ist zwar ein großer Schritt zwischen einem im Laboratorium ausgeführten Versuch und der Anwendung dieses Versuchs für die Praxis, für die Technik, für das Leben. Aber auch hier war es wieder eine Reihe genialer Männer, welche die Anwendbarkeit der Elektrizität für die Technik erkannten und welche ihren Scharfsinn und ihre Geschicklichkeit dazu verwendeten, um diese umfassende Naturkraft der Menschheit dienstbar zu machen. Die Namen Gauß und Weber, Siemens, Edison, Bell und Marconi werden stets als Namen

von Pionieren des Fortschritts geehrt werden. Gauß und Weber richteten den ersten elektromagnetischen Telegraphen ein. Jacobi lehrte zuerst die Anwendung der Elektrizität zur Abscheidung von Metallen und zur Galvanoplastik, Siemens legte durch seine Erfindung der Dynamomaschine den Grund zu der elektrischen Beleuchtung und zur elektrischen Arbeitsleistung, sowie zu den elektrochemischen Prozessen, Edison gab die Einrichtung des elektrischen Glühlichts, Bell schenkte uns im Telephon einen Apparat, dessen Anwendungsfähigkeit ebenso groß ist wie die geniale Einfachheit seiner Konstruktion, und Marconi endlich eröffnete durch seine Telegraphie ohne Draht das große Äthermeer dem menschlichen Verkehr.

I. Teil.

Die Erscheinungsweisen und Wirkungen der Elektrizität.

I. Teil.

Die Erscheinungsweisen und Wirkungen der Elektrizität.

---

1. Kapitel.

Die Reibungselektrizität.

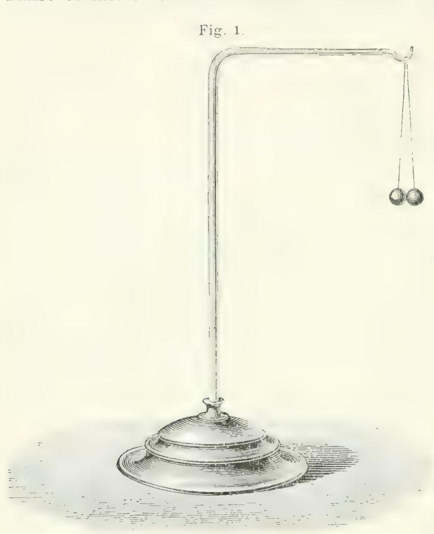
Eine allgemein bekannte Erscheinung ist es, welche die Grundlage für unsere heutige Kenntnis des großen und vielverzweigten Gebietes der Elektrizität bildet. Ein Stück Bernstein (griechisch: Elektron) zeigt, wenn es mit einem Tuch gerieben wird, die Eigenschaft, leichte Körperchen anzuziehen. Kleine Papierschnitzel, leichte Holundermarkkügelchen u. s. w., in deren Nähe man geriebenen Bernstein bringt, fliegen an ihn heran. Von dieser zwar merkwürdigen, aber unscheinbaren Wirkung ist es wohl ein weiter Weg bis zu den heutigen Riesenwirkungen unserer elektrischen Maschinen, aber doch ein Weg, den, nur durch wenige zufällige Entdeckungen noch unterstützt, der menschliche Geist gefunden und gebahnt hat, und auf welchem er, langsam aber sicher fortschreitend, nicht nur die Beherrschung, sondern auch die Erkenntnis der gewaltigsten Naturkraft gewonnen hat.

Wenn wir die Erscheinung beim Bernstein kurz ausdrücken wollen, so werden wir sagen können, daß der Bernstein durch das Reiben in einen eigentümlichen Zustand versetzt wird, in welchem er imstande ist, Kräfte auszuüben, die er sonst nicht zeigt. Diesen eigentümlichen Zustand, den man durch gar nichts sonst erkennt, bezeichnet man als elektrischen. Man sagt, der Bernstein sei elektrisch geworden. Ganz ebenso wie der Bernstein werden aber eine große Reihe anderer fester Körper ebenfalls durch Reiben elektrisch. Es ist ja eine durch Spielversuche schon den Kindern bekannte Tatsache, daß Glas, Siegellack, Kautschuk, Ebonit und andere Stoffe durch bloßes Reiben mit einem Tuch oder mit Pelz die Fähigkeit erlangen, leichte Papierschnitzel, die man auf einen Tisch gestreut hat, anzuziehen. Beobachtet man aber diesen Vorgang genauer, so sieht man, daß er gar nicht so einfach ist. Einzelne von den Papierschnitzeln, die leichteren, fliegen allerdings an eine geriebene Glasstange, an eine geriebene Siegellackstange heran, aber sie bleiben nicht lange an ihr haften, sondern fliegen nach einiger Zeit wieder von ihr fort. Man kann also aus diesem Experiment bloß schließen, daß um einen durch Reiben elektrisierten Körper herum gewisse Kräfte vorhanden sind, die nicht vorhanden sind, wenn der Körper unelektrisch ist. Über die Art

dieser Kräfte und über die Ursache ihres Auftretens kann man aus diesem Experiment noch gar nichts aussagen, weil die Erscheinungen zu kompliziert sind.

Es zeigt sich aber weiter, daß die Papierschnitzel und ähnliche Körper, wenn sie mit einem elektrisierten Gegenstand nur berührt werden, selbst elektrisch werden, daß sie selbst dadurch in den Stand gesetzt werden, Kräfte auszuüben, die sie sonst nicht zeigen. Man kann dies einfach experimentell nachweisen. Man hänge ein Papierstückchen oder besser ein leichtes Holundermarkkügelchen an einem Seidenfaden auf und berühre es mit einem elektrisierten Glasstab. Durch diese Berührung wird das Holundermarkkügelchen selbst elektrisch. Denn wenn man jetzt ein anderes unelektrisches Kügelchen in seine Nähe bringt, so wird dieses auch zuerst angezogen und nach kurzer Zeit wieder abgestoßen.

Fig. 1.



Dieses Verhalten gibt nun ein einfaches Mittel, um zu entscheiden, welcher Art die Kräfte sind, die zwei elektrische Körper aufeinander ausüben. Man hänge an ein Gestell zwei trockene Papierstückchen oder zwei Holundermarkkügelchen nebeneinander auf (Fig. 1). Berührt man beide mit einem elektrisch gemachten Glasstab, so werden dadurch beide in gleicher Weise elektrisch und diese beiden in gleicher Weise elektrisierten Körper stoßen sich nun sofort ab und beharren bei dieser Abstoßung. Auch werden beide von dem Glasstab abgestoßen. Ganz dasselbe findet statt, wenn man die Kügelchen nicht mit einem elektrischen Glasstab berührt hat, sondern mit einem elektrischen Siegellackstab oder Ebonitstab u. s. w. Immer stoßen sich zwei in gleicher Weise elektrisierte Körper ab.

Wenn man aber so verschiedene geriebene Substanzen benutzt, Glas, Siegellack, Ebonit, so findet man doch außer dieser Gleichheit der Wirkung auch einen wesentlichen Unterschied zwischen ihnen. Hat man die Kügelchen in Fig. 1 z. B. durch Berühren mit einem elektrischen Glasstab elektrisch gemacht, so stoßen sie sich gegenseitig ab und jedes wird auch von dem Glasstab abgestoßen. Dagegen wird jedes der beiden Kügelchen von einer elektrisierten Siegellackstange, die man in die Nähe bringt, angezogen. Auch das Umgekehrte findet statt. Wenn man die Kügelchen durch Berühren mit der geriebenen Siegellackstange elektrisiert, so

stoßen sie sich gegenseitig ab und werden auch von der Siegellackstange abgestoßen. Dagegen werden sie von einer geriebenen Glasstange angezogen. Wir erfahren also dadurch, daß das, was wir elektrischen Zustand nennen, noch von verschiedener Art sein kann. Eine geriebene Glasstange ist in anderer Weise elektrisch, als eine geriebene Siegellackstange. Was die eine anzieht, stößt die andere ab. Man hat diese Erfahrungstatsache dadurch ausgedrückt, daß man elektrisierte Körper als positiv und negativ unterschied. Man ist übereingekommen, eine durch Reiben mit Pelz elektrisch gewordene Siegellackstange negativ elektrisch zu nennen, die geriebene Glasstange, die sich entgegengesetzt verhält, also positiv elektrisch.

Die bisher angeführten Tatsachen kann man daher ganz kurz folgendermaßen aussprechen:

Gleichnamig elektrisierte Körper stoßen einander ab, ungleichnamig elektrisierte Körper ziehen einander an.

Die Körper, von denen bisher die Rede war: Glas, Siegellack, Ebonit, Kautschuk, Papier, Holundermark u. s. w., waren lauter unmetallische Stoffe. Diese Körper werden also erstens durch Reiben leicht elektrisch, und zwar nur an den Stellen, an denen sie gerieben wurden, und zweitens, sie behalten ihren elektrischen Zustand, wenn er einmal erregt ist. Ganz wesentlich anders verhalten sich die Metalle und ebenso wie diese auch eine Reihe anderer Substanzen, viele Flüssigkeiten, feuchtes Holz, Erde u. s. w., ebenso verhält sich insbesondere auch der menschliche Körper. Hält man nämlich einen Metallstab in der Hand und reibt ihn, so findet man keine Spur von elektrischer Wirkung, keine Anziehungen auf Papierschnitzel oder dgl. Trotzdem ist der elektrische Zustand auf ihm erzeugt worden. Aber die Metalle und die anderen erwähnten Körper haben noch die weitere Eigenschaft, daß sich dieser elektrische Zustand mit der größten Leichtigkeit und Schnelligkeit über ihre ganze Oberfläche verbreitet. Daher bleibt auf einem geriebenen Metallstab der elektrische Zustand nicht an der geriebenen Stelle allein, sondern verbreitet sich sofort über das ganze Metall, und wenn er in der Hand gehalten wird, über die Hand und den ganzen Körper des Menschen, über den Fußboden und die Wände des Zimmers, in dem man sich befindet, schließlich über die ganze Erde, so daß er auf eine so überaus große Fläche verteilt ist, daß an jeder einzelnen Stelle seine Wirkung zu klein ist, um erkannt zu werden. Man bezeichnet diese Verteilung des elektrischen Zustandes kurz dadurch, daß man sagt, die Elektrizität ist zur Erde abgeleitet.

Daraus folgt: Will man ein Metall in den elektrischen Zustand versetzen, so darf man es nicht direkt in der Hand halten, sondern man muß es mit einem Griff von Glas, Siegellack, Ebonit u. s. w. versehen. Ebenso überspinnt man aus diesem Grund Drähte mit Seide oder umgibt sie mit Kautschuk. Nur dann bleibt der elektrische Zustand auf dem Metall, wenn er dort entwickelt wurde, und wird nicht abgeleitet und verbreitet. Man sagt von einem solchen Metall, es sei isoliert. In der Tat kann man ein isoliertes Metallstück durch Reiben elektrisch machen und in diesem Zustand erhalten.

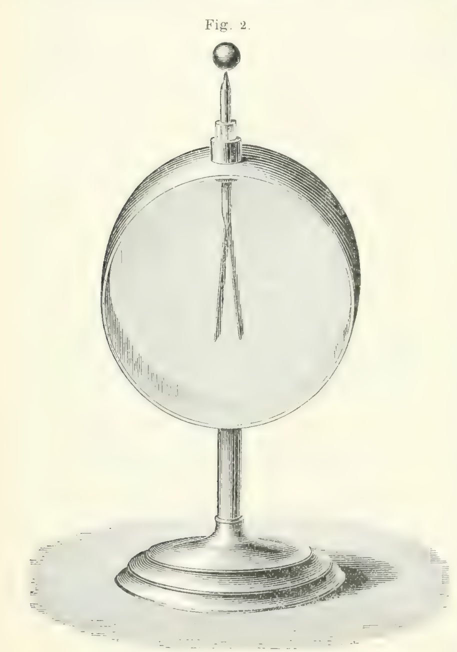
Man unterscheidet also in elektrischer Beziehung zwei Klassen von

Körpern. Die Stoffe, wie Glas, Siegellack u. s. w., nennt man Isolatoren, weil sie die Elektrizität auf sich bewahren, isolieren, wenn sie einmal auf ihnen erregt ist. Die Metalle und die erwähnten anderen Stoffe nennt man Leiter oder Konduktoren, weil sie die Elektrizität sofort weiterleiten.

Auf einem isolierten Leiter kann man den elektrischen Zustand durch Reiben oder Berühren leicht herstellen. Derselbe bleibt auf ihm bestehen, weil eben der Leiter isoliert ist. Nicht nur die wirklich geriebenen oder berührten Teile werden elektrisch, sondern der Leiter in seiner ganzen Oberfläche. Die Elektrizität verbreitet sich sofort über die ganze Oberfläche des Leiters. Berührt man einen elektrisierten Leiter mit der Hand, so wird er vollständig unelektrisch, nicht nur an dem berührten Punkte, sondern überall, weil die ganze Elektrizität zur Erde abgeleitet wird.

Man sieht daraus zunächst rein praktisch, daß ein isolierter Leiter für elektrische Untersuchungen große Vorzüge vor einem Isolator hat. Ein Leiter muß, wenn er bloß an einer Stelle mit einem elektrisierten Körper berührt wurde, überall elektrisch werden, und kann ebenso einfach durch bloßes Ableiten an einer Stelle ganz unelektrisch gemacht werden. Man verwendet deshalb für elektrische Untersuchungen gewöhnlich isolierte Leiter.

Fig. 2.



Die erste Anwendung, die man von diesem Verhalten der Leiter machen kann, ist die Konstruktion eines zweckmäßigen Apparates, der dazu dient, anzuzeigen, ob ein Körper elektrisch ist oder nicht, eines Elektroskops. Man nimmt (Fig. 2) zwei leichte Streifchen von Blattgold als leitende Körper, befestigt diese an einem Stäbchen aus Metall, das an seinem anderen Ende eine Metallkugel, einen Knopf, trägt, und steckt das Stäbchen isoliert, durch Paraffin oder Bernstein, in ein Gehäuse mit Glaswänden. Damit ist ein einfaches Elektroskop konstruiert. Sobald der Knopf des Apparates mit einem elektrischen Körper berührt wird, wird ihm etwas Elek-

trizität mitgeteilt (der Apparat wird geladen); diese Elektrizität verteilt sich über das Stäbchen und die Streifchen von Blattgold, da diese ja Leiter sind, und die beiden leichten Streifchen stoßen einander ab, da sie ja gleichnamig elektrisiert sind. Es zeigt sich also die Elektrizität eines Körpers, mit dem man den Knopf berührt, durch die Divergenz der Goldblättchen an. Man nennt den Apparat ein Goldblattelektroskop, obwohl die Streifchen jetzt gewöhnlich aus Aluminiumfolie, statt aus Blattgold gemacht werden. Man kann diesen Apparat sofort dazu benutzen, um auf einfache Weise zu untersuchen, welche Körper durch Reiben positiv elektrisch werden und welche negativ. Man berührt z. B. den Knopf des Elektroskops mit einer geriebenen Siegellackstange. Dann werden die Goldblättchen negativ elektrisch und stoßen sich ab. Bringt man nun an den Knopf einen anderen negativ elektrischen Körper, so werden die Goldblättchen stärker negativ und divergieren infolgedessen mehr als früher; bringt man aber einen positiv elektrischen Körper heran, so werden die Goldblättchen schwächer negativ und divergieren infolgedessen weniger. Auf diese Weise kann man also untersuchen, welche Körper durch Reiben positiv und welche negativ elektrisch werden.

Dabei findet man, daß durch Reiben zweier elektrischer Körper aneinander immer beide Körper elektrisch werden, und zwar der eine immer positiv, der andere negativ. So wird Siegellack durch Reiben mit Kautschuk negativ, der Kautschuk selbst positiv elektrisch. Glas wird durch Reiben mit Zinnamalgam (das man auf Leder aufstreicht) positiv, das Amalgam negativ elektrisch. Harze und Schwefel werden durch Reiben mit Wolle oder Seide oder Leinen negativ elektrisch, die Wolle u. s. w. werden dabei positiv elektrisch.

Eine zweite, wichtige Anwendung des Goldblattelektroskops besteht darin, zu untersuchen, ob ein Körper ein Leiter ist oder ein Isolator. Hat man die Goldblättchen durch Elektrisieren zur Divergenz gebracht, so bleiben sie so lange divergent, als ihre Elektrizität nicht zur Erde abgeleitet wird. Berührt man den Knopf des Elektroskops mit einer (unelektrischen) Glasstange, so bleiben die Goldblättchen divergent, denn Glas ist ein Isolator. Berührt man ihn dagegen mit einem unisolierten Metallstab, den man in der Hand hält, oder auch bloß mit dem Finger, so fallen die Goldblättchen sofort zusammen, denn die Elektrizität hat sich sofort über die ganze Erde verbreitet. Auf diese Weise erkennt man sofort, daß die Luft ein Isolator ist. Denn der Knopf des Apparates ist ja für gewöhnlich stets mit Luft in Berührung und die Blättchen bleiben doch divergent. Man kann so alle Körper daraufhin untersuchen, ob sie Leiter oder Isolatoren sind. Aber dabei zeigt es sich, daß dieser Unterschied nicht ein ganz scharfer ist, daß vielmehr ein stetiger Übergang zwischen Leitern und Isolatoren stattfindet. Legt man nämlich ein unisoliertes Metall an den Knopf des (geladenen) Elektroskops, so fallen die Goldblättchen im Moment zusammen. Ebendasselbe geschieht, wenn man den Knopf mit der Hand oder mit Kohle oder mit feuchten Stoffen berührt. Berührt man den Knopf dagegen z. B. mit Papier, so findet im ersten Moment kein Zusammenfallen der Goldblättchen statt, aber ganz allmählich divergieren sie immer weniger und nach mehr oder minder langer Zeit hängen sie unelektrisch neben-

einander. Berührt man den Knopf mit trockenem Glas oder mit Schellack u. s. w., so dauert es sehr lange Zeit, bis die Goldstreifchen zusammenfallen, aber am Ende hört die Divergenz doch auf, und selbst, wenn der Knopf bloß mit der Luft in Berührung ist, wird die Divergenz allmählich, in Tagen, geringer, bis sie ganz verschwunden ist. Man ersieht daraus, daß man die Körper nicht einfach streng in Leiter und Isolatoren scheiden darf, sondern daß man vielmehr sagen muß, alle Körper leiten die Elektrizität, aber in außerordentlich verschiedenem Maße. Die Metalle leiten außerordentlich gut, andere Substanzen wie Papier viel schlechter, die sogenannten Isolatoren ganz überaus schlecht. Für praktische Zwecke kann man aber die Einteilung in Leiter und Isolatoren immer beibehalten. Zu den Leitern gehören alle Metalle, ferner Kohle, Graphit, Säuren, Salzlösungen, menschliche und tierische Körper, Leinen, Baumwolle; zu den Isolatoren gehören Öle, Kautschuk, Porzellan, Leder, Wolle, Seide, Glimmer, Glas, Wachs, Paraffin, Schwefel, trockene Salze, Bernstein, Schellack, die Luft und andere Gase. Alle die letzterwähnten Substanzen, wenn sie trocken sind, kann man also zum Isolieren von Leitern benutzen.

Wenn wir einen isolierten Leiter durch Berühren, etwa mit geriebenem Glas, elektrisch machen, so bleibt die Elektrizität auf dem Leiter nicht an der Berührungsstelle allein, sondern der ganze Leiter wird sofort elektrisch. Man sagt, die *Elektrizität verteilt sich auf dem Leiter*. Berühren wir den Leiter nun zum zweitenmal mit einem elektrischen Glasstab, so wird ihm wieder neue Elektrizität mitgeteilt, die sich auch wieder über die ganze Oberfläche des Leiters verteilt. Und so können wir dem Leiter ein drittes, ein viertes Mal Elektrizität zuführen u. s. w. Es wird dadurch der isolierte Leiter immer stärker elektrisch, er wird immer stärker *geladen*. Je stärker der Körper geladen ist, desto kräftiger stößt er ein aufgehängtes elektrisiertes Markkügelchen unter sonst gleichen Umständen ab. Man kann auch in übertragener Weise dies so ausdrücken, daß man sagt, ein elektrischer Körper, der, unter sonst gleichen Umständen, eine größere Kraft auf ein elektrisiertes Markkügelchen ausübt, enthält eine größere *Elektrizitätsmenge* oder *Ladung*. Selbstverständlich unterscheidet man positive und negative Elektrizitätsmengen. Wir schließen also aus der Kraft, die ein elektrischer Körper zeigt, auf die Elektrizitätsmenge, die er enthält. Üben zwei geladene Körper die gleiche Kraft auf dasselbe geladene Markkügelchen in derselben Entfernung aus, so sagen wir, sie enthalten gleiche Elektrizitätsmengen. Übt der eine eine doppelt so große Kraft aus, so sagen wir, er enthält eine doppelt so große Elektrizitätsmenge. Wir messen dann also die gesamte Elektrizitätsmenge, die ein Körper enthält, aus der Kraft, die er auf ein in bestimmter Entfernung befindliches kleines elektrisches Markkügelchen ausübt.

Die Kraft nun, die ein elektrisierter Körper auf einen anderen ausübt, ist an Größe verschieden, je nach der Entfernung, in welcher die beiden Körper sich voneinander befinden. Es entstand natürlich die Frage: In welcher Weise hängt diese Kraft von der Entfernung der beiden Körper voneinander ab? Um dies zu entscheiden, muß man das Experiment befragen und muß sehr kleine elektrisierte Körper daraufhin untersuchen, weil bei diesen ihre Gestalt nicht mehr von Einfluß ist. Das Grundgesetz

nun, das *Coulomb* durch eine mühsame Untersuchung gefunden hat, lautet:

Die Kraft, welche zwei kleine elektrisierte Körper aufeinander ausüben, ist gleich dem Produkt ihrer Elektrizitätsmengen, dividiert durch das Quadrat ihrer Entfernung, und diese Kraft ist eine abstoßende, wenn die beiden Körperchen gleichnamig, eine anziehende, wenn sie ungleichnamig elektrisiert sind.

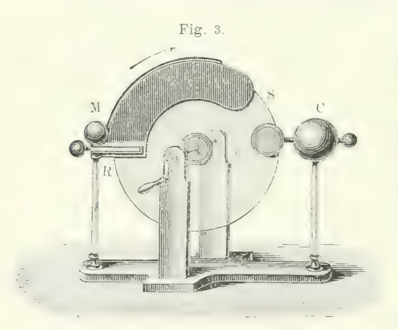
Dieses Gesetz, das im Jahre 1785 gefunden wurde, nennt man nach seinem Entdecker das *Coulombsche Gesetz.*

Wir können das Coulombsche Gesetz zunächst mit Leichtigkeit dazu benutzen, um Elektrizitätsmengen in genau bestimmtem Maße zu messen, d. h. um uns eine Einheit zu schaffen, in der wir alle Elektrizitätsmengen ausdrücken. Wir sahen, daß wir auf die Größe einer Elektrizitätsmenge schließen aus der Kraft, welche sie ausübt. Nun werden aber Kräfte in der Physik ein für allemal in einer bestimmten Einheit, die man 1 Dyne nennt, ausgedrückt. Es ist z. B. die Anziehungskraft, welche die Erde auf ein Kilogramm ausübt (das Gewicht eines Kilogramms), in dieser Einheit gleich 981 000 Dynen. Eine Dyne ist daher ungefähr gleich der Kraft, mit welcher die Erde ein Milligramm anzieht, also gleich dem Gewicht eines Milligramms; genauer ist das Gewicht eines Milligramms bloß gleich 0,981 Dynen. Benutzen wir diese Einheit für die Kraft, so können wir nach dem Coulombschen Gesetz sagen: wir wollen diejenige Elektrizitätsmenge als Einheit wählen, welche auf eine gleich große in der Entfernung von 1 cm befindliche eine Kraft ausübt, deren Größe gerade 1 Dyne ist. Dies ist die sogenannte *elektrostatische Einheit* der Elektrizitätsmenge, weil sie aus dem Grundgesetz der Elektrostatik, dem Coulombschen Gesetz, folgt. Statt dieser Einheit braucht man aber für praktische Zwecke stets eine andere, welche dreitausendmillionenmal so groß wie die von uns bestimmte ist. Man nennt diese praktisch gebrauchte Einheit 1 *Coulomb*. So spricht man von 10 Coulomb, 0,5 Coulomb u. s. w., die ein elektrischer Körper enthält. Der Grund, der zur Einführung dieser Einheit geführt hat, wird später klar werden; vorläufig genügt es festzusetzen, daß wir alle Elektrizitätsmengen in Coulomb messen. Man sieht aber, daß ein Körper, der die Elektrizitätsmenge 1 Coulomb enthalten würde, ganz außerordentlich große Kräfte auf einen zweiten, ebenfalls mit 1 Coulomb geladenen Körper ausüben würde, da 1 Coulomb gleich dreitausend Millionen ($3 . 10^9$) elektrostatischen Einheiten ist. Schon Ladungen von 1 millionstel Coulomb bringen große Kräfte hervor. Man bezeichnet 1 millionstel Coulomb als 1 *Mikrocoulomb*. Wir können leicht ausrechnen, daß zwei kleine Körper, von denen jeder mit 1 Mikrocoulomb, d. h. 3000 elektrostatischen Einheiten, geladen wäre, wenn sie 1 cm Abstand voneinander haben, eine Kraft aufeinander ausüben würden, die gleich 9 Millionen Dynen, also etwa gleich dem Gewicht von 10 Kilogramm wäre. Würden wir den einen Körper, mit 1 Mikrocoulomb geladen, etwa auf eine Wagschale legen und den anderen, mit 1 Mikrocoulomb der entgegengesetzten Elektrizität geladen, 1 cm unterhalb der Wagschale anbringen, so müßten wir auf die andere Wagschale der Wage zirka 10 Kilo auflegen, um die

Wage trotz der Anziehung der beiden geladenen Körper im Gleichgewicht zu halten.

Das Coulombsche Gesetz erfordert übrigens noch eine wesentliche Ergänzung, um allgemein richtig zu sein, eine Ergänzung, die erst lange nach Coulomb von Faraday (1837) gefunden wurde. Nach dem Coulombschen Gesetz, wie es oben ausgesprochen wurde, scheint es, als ob die Kraft zwischen zwei elektrisierten Körpern, die einen bestimmten Abstand voneinander haben, immer dieselbe ist, ob sich nun Luft zwischen den Körpern befindet oder irgend eine andere Substanz, etwa Petroleum, Glas oder dgl. Das ist aber, wie Faraday fand, nicht richtig. Das Zwischenmedium zwischen den beiden geladenen Körpern wird durch die geladenen Körper selbst beeinflußt und modifiziert daher auch die Kraft zwischen ihnen und zwar so, daß diese Kraft für jedes feste oder flüssige Zwischenmedium kleiner ist, als wenn bloß die Luft dazwischen ist. Also z. B., wenn zwischen unseren beiden obigen Körpern von je 1 Mikrocoulomb Ladung nicht die Luft wäre, sondern etwa Petroleum, so wäre die Kraft zwischen ihnen nicht 10 Kilogramm, sondern, wie man mit der Wage messen könnte, nur $\frac{10}{2,2}$ Kilogramm, und wenn Rizinusöl dazwischen wäre, nur etwa $\frac{10}{4,3}$ Kilogramm. Jede (isolierende) Substanz verringert also die Kraft zwischen zwei geladenen Körpern in einem bestimmten Verhältnis. Die Zahl 2,2 im Fall des Petroleums, oder 4,3 im Fall des Rizinusöls nennt man die Dielektrizitätskonstante der Substanz. Wir werden noch öfter von ihr zu sprechen haben.

Fig. 3.



Es liegt der Gedanke nahe, eine Maschine zu konstruieren, welche gestattet, auf bequeme Weise durch Reiben Elektrizität fortwährend zu erzeugen und zugleich einen isolierten Leiter mit ihr zu laden. Diese Aufgabe wird durch die Elektrisiermaschine gelöst. Statt eine Glasröhre in der Hand mit Leder zu reiben, setzt man eine runde Glasscheibe S (Fig. 3) fest auf eine Achse auf, durch welche man sie mittels einer Kurbel drehen kann, und läßt nun die Glasscheibe bei der Drehung sich fortwährend an zwei mit Zinnamalgam bestrichenen Lederscheiben R, dem sogenannten Reibzeug, reiben. Das Reibzeug ist durch Schrauben ziemlich fest gegen die Glasscheibe angedrückt. Dadurch wird also auf der Scheibe fortwährend positive Elektrizität erzeugt, auf dem Reibzeug negative. Um nun die positive Elektrizität der Glasscheibe auf einen isolierten Leiter C zu übertragen, benutzt man folgende Anordnung, deren Begründung sofort gegeben werden wird. Man verbindet mit dem Leiter C (den man den einen Konduktor der Elektrisiermaschine nennt. M ist der andere) zwei Holzringe, welche die Scheibe zwischen sich hindurch rotieren lassen,

und welche mit feinen Spitzen, Nähnadeln, der Scheibe gegenüber besetzt sind. Diese Spitzen saugen, wie wir sofort erklären werden, die positive Elektrizität aus der Glasscheibe fortwährend in sich, und da sie in leitender Verbindung mit dem Konduktor C stehen, so verbreitet sich die Elektrizität von ihnen aus auf den Konduktor. Der isolierte Leiter C wird also positiv geladen und zwar um so stärker, je länger man die Glasscheibe dreht. Zugleich steht das Reibzeug R in Verbindung mit einem anderen Leiter M, und auf diesem verbreitet sich die negative Elektrizität. Gewöhnlich aber verbindet man diesen Leiter mit der Erde, so daß seine Elektrizität zur Erde abgeleitet ist. An dem Reibzeug ist noch ein nach oben gebogener Ebonitstab befestigt, an welchem zwei Stücke Seidenzeug hängen, die von dem Reibzeug an bis beinahe zu den Saugspitzen sich an die Glasscheibe anschmiegen. Dadurch wird ein Ausgleich der beiden Elektrizitäten vermieden und die Maschine wird daher wirksamer.

So haben wir also ein einfaches Mittel, um dem Leiter C positive und dem Leiter M negative Elektrizität in großem Betrag zuzuführen.

Wie aber verteilen sich diese zugeführten Ladungen auf dem Leiter? Wir haben gesehen, daß ein Leiter die Eigenschaft hat, daß in ihm der elektrische Zustand nicht an einem einzigen Punkte oder an einigen wenigen Stellen bleiben kann, sondern daß er sich sofort über den ganzen Leiter verbreitet, wenn er an *einem* Punkte erregt ist.

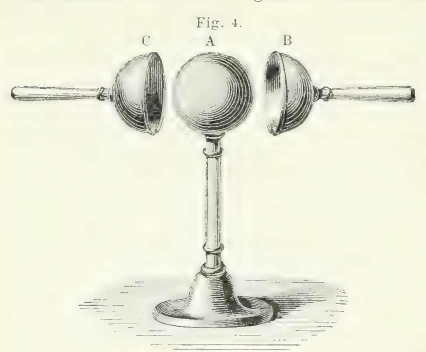
Teilt man daher einem Leiter an einer Stelle eine gewisse Menge Elektrizität mit, so muß diese zunächst wegen ihrer absolut leichten Beweglichkeit auf dem Leiter sich verschieben. Denn die einzelnen elektrischen Teilchen der Ladung suchen sich gegenseitig so weit als möglich abzustoßen und dieser gegenseitigen Abstoßung folgt die Elektrizität so lange, bis die ganze Ladung nur an der Oberfläche des Leiters ist, wo sie durch den angrenzenden Isolator verhindert wird, weiter den gegenseitigen Abstoßungskräften zu folgen. Erst dann ist ein Ruhezustand, ein *Gleichgewichtszustand* erreicht. Daraus ergibt sich also der Satz:

Wenn die Elektrizität in einem Leiter im Gleichgewicht ist, so kann sie sich nur an der Oberfläche des Leiters befinden. Das Innere muß unelektrisch sein.

Faraday hat diese Folgerung durch einen großen Versuch bestätigt. Er ließ einen enormen Würfel aus Kupferdraht machen, einen Würfel von mehr als 3 m Seitenlänge, in welchen also ein Mann bequem hineingehen konnte. Die Wände dieses Würfels ließ er mit Stanniolpapier, einem leitenden Körper, überziehen. Dann begab er sich selbst mit sehr empfindlichen Elektroskopen in diesen Würfel hinein, der isoliert aufgestellt war, und ließ den Würfel von außen durch eine Elektrisiermaschine sehr stark elektrisieren. Trotzdem nun auf der Oberfläche des Würfels außerordentlich große Elektrizitätsmengen vorhanden waren, konnte er inwendig, auch an der Innenfläche des Stanniols, nicht eine Spur von Elektrizität nachweisen. Die obige Folgerung ist damit bestätigt. Es läßt sich die Richtigkeit dieses Satzes auch durch einen einfachen Versuch zeigen. Eine isolierte Metallkugel A (Fig. 4) wird stark elektrisiert und dann mit den beiden metallischen Halbkugeln B und C, die an isolierten Griffen befestigt sind, vollständig bedeckt. Dadurch bildet die Kugel

mit den beiden Halbkugeln einen einzigen Leiter, und die Elektrizität kann nach unserem Satze nicht auf A bleiben, sondern muß auf die Oberfläche von B und C gehen. In der Tat, wenn man die Halbkugeln nun wieder abnimmt, zeigt sich A vollkommen unelektrisch, während B und C elektrisch sind.

Fig. 4.



Es ist also in der Tat durch den Versuch bewiesen, daß ein Leiter, wenn er im elektrischen Gleichgewicht ist, nur an seiner Oberfläche elektrisch ist. Gerade diese auffallende Eigenschaft der Leiter legt die Frage nahe, worin eigentlich die Ladung eines Körpers, speziell eines Leiters besteht. Diese Frage hat seit mehr als hundert Jahren viele und die besten Köpfe beschäftigt und erst seit wenigen Jahren ist man nach vielfachem Schwanken zu einer einfachen und widerspruchslosen Auffassung gelangt. Man nimmt nämlich jetzt an, und viele der im folgenden zu besprechenden Erscheinungen weisen darauf hin, daß die beiden Elektrizitäten wirklich zwei besondere Stoffe sind, zwei sehr feine Stoffe, welche, wie alle anderen Stoffe, die wir kennen, nicht zusammenhängend, sondern in einzelne Teile, Atome, geteilt sind. So wie wir von Atomen des Wasserstoffs und des Kupfers sprechen, so haben wir auch Grund, von den Atomen zweier anderer chemischer Stoffe zu sprechen, den Atomen der positiven Elektrizität und denen der negativen Elektrizität. Diese Atome der Elektrizität wollen wir vorläufig schon mit dem Namen E l e k t r o n e n bezeichnen und positive und negative Elektronen unterscheiden. In den Isolatoren sind diese Elektronen mit den gewöhnlichen Molekülen in mehr oder minder fester Verbindung, dagegen in den Leitern können diese Atome, ohne Verbindung mit dem Stoff des Leiters, sich frei bewegen. Dann wird also auch auf der Oberfläche eines geladenen Leiters eine sehr dünne Schicht von Elektronen wirklich aufliegen. Nach dieser Auffassung liegt in Wirklichkeit die Elektrizität zwischen Isolator und Metall in einer für unsere Apparate unmeßbar dünnen Schicht. Das Metall des Leiters spielt dabei eine wichtige Rolle. Der Leiter bewirkt nämlich, daß an der g a n z e n Oberfläche sofort der elektrische Zustand entsteht, wenn er auch nur an einer Stelle erregt wurde. Durch den Leiter können sich eben die Elektronen mit der größten Leichtigkeit verschieben, und sie sammeln sich daher an der Oberfläche an, wo sie der Isolator an der weiteren Verschiebung hindert.

Längs der ganzen Oberfläche eines geladenen Leiters haben wir also eine elektrisierte Schicht, deren einzelne Teile sich gegenseitig abzustoßen suchen. Wir können uns eine solche Schicht zweckmäßig unter dem Bilde eines dünnen Häutchens vorstellen, welches den Leiter umgibt. Eine solche Schicht verhält sich nämlich in gewisser Weise ähnlich wie ein Kautschuk-

ballon oder wie eine Seifenblase, die man aufbläst. Wie bei diesen der Druck der eingeblasenen Luft bewirkt, daß der Kautschuk oder das Seifenwasser sich ausdehnen, so bewirkt bei der Elektrizität die gegenseitige Abstoßung der Elektronen, daß sich eine dem Leiter zugeführte Ladung bis an die Oberfläche desselben ausdehnt und gewissermaßen ein elektrisches Häutchen um den Leiter bildet. So wie bei einem aufgeblasenen Kautschukballon der Kautschuk eine gewisse Spannung besitzt, nämlich eine so große, daß sie dem Druck der eingeschlossenen Luft das Gleichgewicht hält, so besitzt auch ein solches elektrisches Häutchen eine gewisse Spannung, nämlich eine solche, daß sie dem Druck der gegenseitigen Abstoßungskräfte das Gleichgewicht hält.

Deswegen schreiben wir jedem elektrisierten Leiter eine gewisse Spannung oder, wie man dasselbe gelehrter ausdrückt, ein gewisses Potential zu, eine Spannung, die man sich eben am besten unter dem Bilde eines gespannten Häutchens klarmacht. Man kann auch leicht folgendes in bezug auf die Größe dieser Spannung einsehen. Führt man eine und dieselbe Elektrizitätsmenge, z. B. 1 Mikrocoulomb, einmal einer kleinen, dann einer großen Metallkugel zu, so muß die Spannung der elektrischen Schicht beidemal verschieden sein. Und zwar muß sie bei der großen Kugel kleiner sein als bei der kleinen. Denn da die Spannung dem Druck der Abstoßungskräfte das Gleichgewicht halten muß, da aber diese Abstoßungskräfte bei der großen Kugel wegen der größeren Entfernung der Teilchen voneinander kleiner sind als bei der kleinen Kugel, so ist auch die Spannung der elektrisierten Schicht bei der großen Kugel kleiner als bei der kleinen.

Allgemein werden wir also sagen müssen, daß jeder Leiter, dem man eine gewisse Elektrizitätsmenge zugeführt hat, eine gewisse Spannung besitzt, und daß diese Spannung abhängt, außer von der zugeführten Elektrizitätsmenge, von der Form und Größe des Leiters. Für einen und denselben Leiter, z. B. eine Kugel, wird die Spannung natürlich wachsen, wenn die zugeführte Elektrizitätsmenge wächst. Denn führt man einer und derselben leitenden Kugel einmal 1 Mikrocoulomb, das andere Mal 10 Mikrocoulomb zu, so sind die Drucke infolge der Abstoßungskräfte im zweiten Fall zehnmal so groß wie im ersten, weil sich eben jetzt größere Elektrizitätsmengen abstoßen, und daher ist auch die Spannung der Kugel bei der größeren Ladung größer als bei der kleineren.

Wir können uns dies wieder durch eine Analogie leicht klarmachen. Wenn man in ein allseitig geschlossenes Gefäß, z. B. in eine Glaskugel, ein Gas hineinbringt, so wird das Gas einen Druck auf die Wände des Gefäßes ausüben und selbst auch unter diesem Drucke stehen. Je mehr Gas wir in das Gefäß bringen, um so größer ist der Druck des Gases. Was nun bei dem gasgefüllten Körper der Druck ist, ist bei dem mit Elektrizität geladenen Leiter die Spannung. Bei einem gaserfüllten Gefäß wächst der Druck, wenn die Menge des Gases zunimmt, und wird der Druck geringer, wenn die Menge abnimmt. Ebenso wird bei einem elektrischen Leiter die Spannung größer, wenn man ihn mit mehr Elektrizität ladet, und geringer, wenn man ihm weniger Elektrizität zuführt. Wenn man ferner eine und dieselbe Menge Gas, z. B. 1 g, in Gefäße von verschiedener Form und Größe bringt, so wird der Druck jedesmal ein anderer sein. Nämlich in dem

Gefäß mit größerem Inhalt, mit größerer Kapazität, wird dieselbe Menge Gas einen kleineren Druck ausüben, in einem Gefäße mit kleinerem Inhalt einen größeren. Das Verhältnis zwischen der Menge des eingeführten Gases und dem dadurch erzeugten Druck hängt also ganz allein ab von dem Inhalt, von der Kapazität des Gefäßes. Ganz ebenso ist es bei einem elektrischen Leiter. Das Verhältnis der Elektrizitätsmenge, die auf dem Leiter liegt, zu der Spannung, die dadurch hervorgebracht ist, hängt nur ab von der Gestalt und Größe des Leiters, welcher mit dieser Elektrizität geladen ist. Man nennt dieses Verhältnis auch hier, wie in unserem Beispiel, die K a p a z i t ä t des Leiters. Die Kapazität eines Leiters gibt also an, in welchem Verhältnis stets die auf dem Leiter liegende Elektrizitätsmenge zu ihrer Spannung steht. Es ist die

$$\text{Kapazität} = \frac{\text{Elektrizitätsmenge}}{\text{Spannung}}.$$

Die Kapazität eines Leiters bei der Ladung mit Elektrizität entspricht also dem Volumen eines Gefäßes bei der Füllung mit Gas.

Man kann bei vielen Körpern die Kapazität aus ihren Dimensionen berechnen, bei allen sie leicht durch Versuche bestimmen, wie wir später sehen werden. Kennt man nun die Kapazität eines Leiters und weiß man, wie viel Elektrizität er enthält, so weiß man auch, welches seine Spannung ist, denn es ist seine

$$\text{Spannung} = \frac{\text{Elektrizitätsmenge}}{\text{Kapazität}}.$$

Und umgekehrt, kennt man die Kapazität und die Spannung, so weiß man auch, wie groß die Elektrizitätsmenge auf dem Körper ist, denn es ist seine

$$\text{Elektrizitätsmenge} = \text{Kapazität} \times \text{Spannung}.$$

Um aber die so neu eingeführten Größen, Spannung und Kapazität, nicht bloß im allgemeinen, sondern gründlich zu verstehen, müssen wir sie auch in bestimmten Maßen ausdrücken, und wir müssen untersuchen, wie wir das tun können.

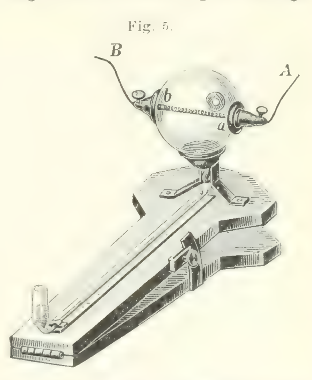
Zwei verschiedene geladene Leiter haben im allgemeinen verschiedene Spannung. Verbinden wir die beiden Leiter nun durch einen Draht, so bilden sie jetzt nur einen einzigen zusammenhängenden Leiter, und da dieser im ganzen e i n e bestimmte Spannung haben muß, so muß sich der Spannungsunterschied zwischen ihnen ausgleichen. Und in der Tat findet eine andere Anordnung der Ladung, der Elektronen, an der Oberfläche statt, so daß jetzt wieder der ganze zusammenhängende Leiter überall dieselbe Spannung hat, es bewegt sich, wie man sagt, die Elektrizität längs des Drahtes von dem einen Leiter zum anderen, bis überall dieselbe Spannung herrscht. Diese Betrachtung können wir auch umkehren:

S t e t s, w e n n w i r b e o b a c h t e n, d a ß d i e E l e k t r i z i t ä t s i c h v o n e i n e m L e i t e r A z u e i n e m L e i t e r B b e w e g t, d r ü c k e n w i r d a s s o a u s, d a ß w i r s a g e n, d i e b e i d e n L e i t e r A u n d B h a b e n e i n e n S p a n n u n g s u n t e r s c h i e d (o d e r e i n e P o t e n t i a l d i f f e r e n z), d i e S p a n n u n g i s t

nicht auf dem Leiter A dieselbe wie auf B, sondern sie ist auf A größer als auf B.

Bei dieser Bewegung der Elektrizität zwischen zwei Leitern von verschiedener Spannung entsteht aber, wie sich leicht beweisen läßt, in dem Draht, durch welchen die Elektrizität sich bewegt, immer eine gewisse Wärmemenge, der Draht wird erwärmt. Da nun die Wärme nach den allgemeinen Begriffen der Physik nur eine bestimmte Form der Arbeit ist, so können wir allgemein sagen, daß bei der Bewegung der Elektrizität von einem Leiter A mit höherer Spannung zu einem Leiter B mit geringerer Spannung die elektrischen Kräfte immer eine gewisse Arbeit leisten. Daß dabei der Draht wirklich erwärmt wird, ist durch vielfache Beobachtungen erwiesen. Um es deutlich zu zeigen, kann man sich am besten eines Apparates bedienen, der von Rieß angegeben ist und den man ein Luftthermometer nennt. Man bringt nämlich einen spiralförmig gewundenen Platindraht ab (Fig. 5) in eine hohle Glaskugel, die in ein enges Rohr ausläuft, in welchem etwas Wasser sich befindet. Die Enden des Spiraldrahtes, die durch die Glaskugel eingeschmolzen hindurchgehen, verbindet man nun durch Drähte mit den beiden Leitern A und B von verschiedener Spannung, die sich ausgleichen sollen, z. B. mit den beiden Konduktoren unserer Elektrisiermaschine, von denen der eine positive, der andere negative Spannung besitzt. Dann bildet also der Platindraht die Verbindung zwischen den Konduktoren, und durch ihn bewegt sich beim Ausgleich der Spannungen die Elektrizität. Der Draht wird nun in der Tat dabei wärmer, wie man daraus erkennt, daß die Luft in der Kugel sich ausdehnt und das Wasser in der engen Röhre vor sich hinschiebt.

Fig. 5.



Durch diesen Versuch ist also vorläufig bewiesen, daß bei dem Übergang der Elektrizität von einem Leiter höherer Spannung zu einem solchen von geringerer Spannung Arbeit geleistet wird, und das können wir dazu benutzen, um zunächst für den Unterschied der Spannungen der beiden Leiter ein Maß zu finden und festzusetzen. Wir können uns dabei an ein bekanntes Beispiel bei der Bewegung von Wasser halten. Wenn eine bestimmte Wassermenge (z. B. 10 kg) aus einer Höhe A (z. B. 30 m) unter dem Einfluß der Erdanziehung herunterfällt bis zu einer Höhe B (z. B. 12 m) über dem Erdboden, so ist die Arbeit, welche die Erdschwere dabei leistet, gleich dem Produkt aus der Wassermenge und dem Höhenunterschied, also hier gleich 180 Kilogrammeter.

Ganz ebenso wollen wir jetzt feststellen: Wenn eine gewisse Elektrizitätsmenge (z. B. 10 Coulomb) von einem geladenen Leiter A nach einem Leiter B sich bewegt, also unter dem Einfluß der elektrischen Anziehungs- und Abstoßungskräfte, so ist die Arbeit, welche bei dieser Bewegung von den Kräften geleistet wird, gleich dem Produkt aus der Elektrizitätsmenge

und dem Spannungsunterschied der Leiter A und B. Was also in dem Fall des Wassers der Höhenunterschied ist, das ist hier der Spannungsunterschied. Offenbar haben wir damit den Spannungsunterschied zweier Leiter A und B ganz sicher bestimmt, sobald wir nur die Arbeit messen können (etwa durch Messen der erzeugten Wärme), die nötig ist, um unsere 10 Coulomb von A nach B zu bringen. Dieser Spannungsunterschied ist nämlich gleich dem zehnten Teil der gemessenen Arbeit, weil wir eben 10 Coulomb von A nach B gebracht haben. Bringen wir nur 1 Coulomb von A nach B, so ist die dazu nötige Arbeit genau gleich dem Spannungsunterschied von A und B. Wir haben also folgende Definition:

Der Spannungsunterschied zwischen zwei geladenen Leitern A und B ist gleich der Arbeit, welche nötig ist, um 1 Coulomb von A nach B zu bringen. (Die Kräfte, welche die Elektrizitäten aufeinander ausüben, leisten diese Arbeit.)

Aus dieser Definition können wir aber auch sofort unmittelbar eine passende Einheit für den Spannungsunterschied entnehmen. Eine Arbeit wird nämlich in der Technik in Kilogrammetern (kgm) gemessen, wobei man unter 1 kgm diejenige Arbeit versteht, welche die Erdschwere leistet, wenn 1 kg unter ihrer Wirkung um 1 m herabfällt. Da jedoch die Physik es auch noch mit andern Kräften, als mit der Erdschwere zu tun hat, so hat sie als Arbeitseinheit eine andere gewählt, die man 1 Erg nennt und die so klein ist, daß ein Kilogrammeter 98100000 Erg enthält ($9{,}81 \cdot 10^7$ Erg). Nehmen wir das Erg als Arbeitseinheit, so werden wir also zunächst auch sagen können: an zwei Leitern wird dann die Einheit des Spannungsunterschiedes vorhanden sein, wenn eine Arbeitseinheit (1 Erg) geleistet wird, um 1 Coulomb von einem Leiter zum anderen überzuführen. Diese Einheit hat man aber wegen der Kleinheit des Erg nicht mit einem besonderen Namen bezeichnet, sondern eine andere, bei der nicht 1 Erg, sondern 10 Millionen Erg (10^7 Erg) Arbeit geleistet wird, um 1 Coulomb von dem einen Leiter zum anderen überzuführen. Diese Einheit des Spannungsunterschiedes nennt man 1 Volt. Es ist also

$$1 \text{ Volt} \times 1 \text{ Coulomb} = 10 \text{ Millionen Erg } (10^7 \text{ Erg}).$$

Das ist die Definition für 1 Volt.

Da 1 Kilogrammeter $9{,}81 \cdot 10^7$ Erg enthält, so ist auch

$$1 \text{ Volt} \times 1 \text{ Coulomb} = \frac{1}{9{,}81} \text{ Kilogrammeter.}$$

Wir haben bisher den Spannungsunterschied von irgend zwei Leitern oder allgemein von irgend zwei Stellen A und B zu messen und auszudrücken gelernt.

Nun ist die Erde auch ein Leiter der Elektrizität und für alle Versuche, die wir machen können, ist die Erde als ein unendlich großer Körper anzusehen. Daher wird jede Elektrizitätsmenge, die wir der Erde zuführen, ein Häutchen von kolossal großer Oberfläche bilden. Die Spannung (das Potential) der Erde wird also Null sein, weil der Druck, den die Elektrizitäten aufeinander ausüben, dabei wegen der großen Entfernung Null ist.

Die Spannung (das Potential) der Erde setzen wir also gleich Null. Und nun haben wir auch nicht bloß für den Spannungsunterschied zweier Leiter, sondern für die Spannung jedes Leiters selbst sofort ein bestimmtes Maß.

Der Spannungsunterschied eines Leiters gegen die Erde ist nämlich, da die Spannung der Erde Null ist, direkt gleich der Spannung dieses Leiters selbst.

Auch die Spannung selbst, wie der Spannungsunterschied, hat als Einheit 1 Volt. Wenn wir also sagen, an einem Leiter herrscht die Spannung 8 Volt, so heißt das nichts anderes, als daß die elektrischen Kräfte eine Arbeit von $8 \times 10^7 = 80$ Millionen Erg ausüben müssen, um 1 Coulomb von diesem Leiter A bis zur Erde zu bringen.

Auf diese Weise haben wir also nun ein bestimmtes Maß für Spannungen, nämlich das Volt, so wie wir früher für die Elektrizitätsmengen ein Maß in dem Coulomb festgelegt haben. Wie können wir aber die Spannung eines Leiters wirklich messen? Nun, unser Goldblattelektroskop ist ein Meßinstrument dafür; denn eine einfache Überlegung zeigt, daß die Ausschläge, die es macht, direkt ein Maß für die Spannung des Körpers sind, durch den es geladen wird. Die Kugel mit den Goldblättchen unseres Elektroskops von S. 7 hat eine bestimmte Kapazität. Bringen wir diese Kugel nun in Berührung mit einem großen geladenen Körper, der etwa die Spannung 1000 Volt hat, so wird sie dieselbe Spannung annehmen, wie dieser Körper, also auch 1000 Volt, und es wird infolgedessen die Ladung unserer Kugel eine bestimmte Anzahl Coulomb sein, nämlich gleich der Kapazität der Kugel mal 1000 Volt. Bringen wir die Kugel in Berührung mit einem Körper, der 2000 Volt Spannung hat, so wird die Ladung der Kugel, also auch die der Goldblättchen, die doppelte von vorher sein. Es werden daher die Goldblättchen jetzt auch stärker ausschlagen. Man sieht daraus, daß, wenn wir unser Elektroskop in Verbindung mit einem geladenen Körper bringen, die Ausschläge der Goldblättchen ein Maß geben für die Spannung, die der Körper besitzt. Wir können daher ein solches Elektroskop direkt als Spannungsmesser benutzen, wenn wir nur die Ausschläge desselben meßbar machen. Und wenn wir nur ein für allemal bestimmt haben, wie groß der Ausschlag unseres Elektroskops für 100, 200, 300 u. s. w. Volt ist, so dient uns ein solches Instrument nun immer dazu, um die Spannung eines geladenen Körpers direkt in Volt zu messen.

Ein solches Instrument, ein kalibriertes Elektroskop, welches von Exner konstruiert ist, und das vielfache Anwendung findet, zeigt Fig. 6. In einem mit Glaswänden versehenen Gehäuse steckt isoliert ein Metallstab, der oben an der Klemme A befestigt ist, und der im Gehäuse zwei Aluminiumblättchen (besser als Goldblättchen) B trägt. Wird A mit einem geladenen Körper in Verbindung gesetzt, so schlagen die Goldblättchen aus und ihre Divergenz wird an dem geteilten Maßstab abgelesen. Je größer der Ausschlag, um so größer ist die Spannung des geprüften geladenen Körpers. Die beiden verschiebbaren Platten C und D dienen dazu, beim Transport des Apparates, der namentlich bei Messungen der Luftelektrizität gebraucht wird, die Goldstreifen vor Verletzungen zu schützen.

Sehr bequem sind die in Volt geeichten, sogenannten *absoluten Elektrometer von Braun*, von denen Fig. 7 eine Ansicht gibt. Dieselben bestehen aus einem Metallgehäuse, welches vorn entweder ganz, oder bloß so weit, daß man die Skala sehen kann, durch Glas abgeschlossen ist. In das Metallgehäuse führt isoliert hinein ein festes Metallblech M, welches oben einen Knopf A besitzt und welches innen gabelförmig aufgeschnitten ist und einen drehbaren Aluminiumzeiger Z trägt. Ist das Instrument ohne Ladung, so berühren sich Metallblech und Aluminiumzeiger. Wird der Knopf A aber mit einem elektrischen Körper verbunden,

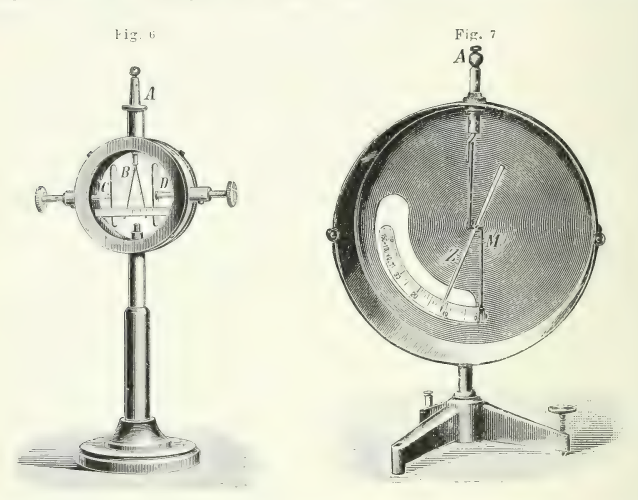


Fig. 6 Fig. 7

so werden beide Teile, das feste Blech und der bewegliche Zeiger, gleichnamig geladen und stoßen sich ab. Die Größe des Ausschlags ist ein Maß für die Spannung des untersuchten Körpers. An der Skala kann man direkt die Spannung in Volt ablesen. Bei dem abgebildeten Instrument entspricht jeder Teilstrich 100 Volt. Je nach der Schwere des beweglichen Zeigers kann man die Instrumente empfindlicher und weniger empfindlich machen.

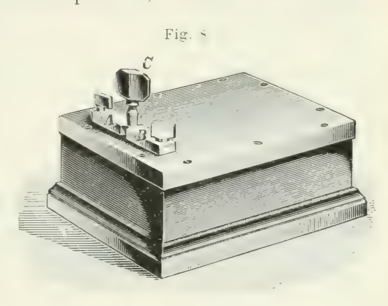
Verbindet man einen geladenen Körper, der z. B. 1000 Volt Spannung besitzt, mit einem solchen Elektrometer, so ist klar, daß die Spannung des Körpers dadurch etwas sinken muß, weil eben jetzt ein Teil seiner Elektrizität auf das Elektrometer übergegangen ist. Das Elektrometer gibt die Spannung an, nicht wie sie der freie Körper, sondern wie sie der mit dem Elektrometer verbundene Körper besitzt. Hat aber das Elektrometer eine sehr kleine Kapazität, wie es die beiden eben angeführten wirklich haben, so ist die auf sie übergehende Elektrizitätsmenge sehr klein, also wird dadurch auch die Spannung des untersuchten Körpers nur sehr wenig geändert.

Auch für die Kapazität eines Leiters können wir nun ein Maß, eine Einheit festsetzen. Da die Kapazität eines Leiters stets gleich dem Verhältnis der auf ihm liegenden Elektrizitätsmenge zu seiner Spannung ist, so können und wollen wir festsetzen, daß derjenige Leiter die Einheit der Kapazität hat, welcher durch die Elektrizitätsmenge 1 Coulomb gerade die Spannung 1 Volt bekommt. Diese Einheit der Kapazität nennt man 1 Farad. Es ist also

$$1 \text{ Farad} = \frac{1 \text{ Coulomb}}{1 \text{ Volt}}.$$

Hat man also z. B. gemessen, daß ein Leiter die Spannung 1500 Volt hat, und hat man andererseits gemessen, daß die Elektrizitätsmenge, die sich auf ihm befindet, $^1/_{200}$ Coulomb ist, so hat der Leiter die Kapazität von $^1/_{300\,000}$ Farad. Für gewöhnliche Zwecke ist das Farad oft unbequem groß; die Leiter, mit denen wir wirklich operieren, haben sehr viel kleinere Kapazitäten als 1 Farad. Deswegen benutzt man gewöhnlich den millionsten Teil desselben als Einheit und nennt diesen 1 Mikrofarad. Unser Leiter hätte also die Kapazität 3,33 Mikrofarad. Man stellt praktisch Leiter her, welche eine Kapazität von einer gewissen Zahl Mikrofarad haben und mit denen man dann die Kapazitäten anderer Leiter vergleichen kann. So zeigt die Fig. 8 ein Instrument, welches 0,1 Mikrofarad Kapazität besitzt. Es besteht aus einem zusammengelegten, sehr großen Stück paraffinierten Papiers, welches auf beiden Seiten mit Stanniol beklebt ist. Das Kästchen, welches das Papier enthält, trägt auf dem Deckel zwei Metallstücke A und B, die voneinander isoliert sind. Das eine dieser Metallstücke ist mit der einen Stanniolfläche, das andere mit der anderen verbunden. Bringt man das eine Metallstück, z. B. A, mit der Erde in Verbindung, und das andere, B, mit einem Leiter, auf dem man dauernd gerade die Spannung 1 Volt aufrecht erhält (was man, wie wir sehen werden, bewirken kann), so geht auf das Stanniol eine Elektrizitätsmenge über, welche gleich

Fig. 8



$$1 \text{ Volt} \times {}^1/_{10} \text{ Mikrofarad} = {}^1/_{10} \text{ Mikrocoulomb ist.}$$

Will man dann die geladene Metallfläche bei B wieder unelektrisch machen, so braucht man bloß den Metallstöpsel C (wie in der Figur) zwischen A und B einzustecken; dann ist B und A metallisch verbunden, und da A mit der Erde verbunden ist, so ist das ganze Stanniol zur Erde abgeleitet, also unelektrisch.

Um einen Leiter elektrisch zu laden, muß man eine gewisse Arbeit aufwenden; umsonst erhält man die Elektrizität nicht. Denn da die elektrischen Kräfte Arbeit leisten können, so ist ein elektrisierter Körper

ein Sitz, eine Quelle von Energie, und Energie ist nirgends in der Natur umsonst zu haben, vielmehr muß man eine gewisse Arbeit aufwenden, um dem Körper eben diese Energie zu erteilen. Den Betrag der Energie eines geladenen Körpers werden wir daher sofort finden können, wenn wir diese Arbeit ermittelt haben.

Wir wissen ja (S. 16), daß die Arbeit, welche die elektrischen Kräfte leisten müssen, um eine Anzahl von Coulomb von einer Stelle, deren Spannung eine beliebige Anzahl von Volt ist, bis zur Erde (Spannung Null) abzustoßen, daß diese Arbeit gleich dem

Produkt aus Anzahl der Coulomb und Anzahl der Volt

ist und dann in 10 Millionen Erg ausgedrückt wird. Gerade so groß, wie die Arbeit ist, welche die elektrischen Kräfte in diesem Falle leisten, gerade so groß ist umgekehrt die Arbeit, welche wir gegen diese Kräfte aufwenden müssen, um diese Anzahl von Coulomb auf diese Spannung zu bringen. Haben wir nun diese Elektrizitätsmenge auf den Leiter gebracht, haben wir also die bestimmte Arbeit aufgewendet, so steckt diese Arbeit jetzt gewissermaßen aufgespeichert in dem Leiter. Der Leiter besitzt, wie man sagt, elektrische Energie, welche ihn dann eben befähigt, Kräfte auf andere Elektrizitätsmengen auszuüben und Arbeit zu leisten.

Es wird also die Energie, die ein elektrischer Leiter enthält, die Arbeit, welche er leisten kann, gemessen durch das Produkt aus seiner Spannung und seiner Elektrizitätsmenge. (Genau ist die Energie des geladenen Leiters das halbe Produkt aus seiner Spannung und seiner Elektrizitätsmenge, weil ja bei der Ladung des Leiters die Spannung erst allmählich, wenn auch rasch, von Null bis zu dem definitiven Endwert anwächst.)

Drücken wir, wie bisher, die Elektrizitätsmengen in Coulomb und die Spannung in Volt aus, so ist also die Energie, die ein Leiter enthält, die Arbeit, die er leisten kann, ausgedrückt in Volt $\times$ Coulomb, wenn wir, wie es gewöhnlich geschieht, auch die Benennungen multiplizieren. Zum Beispiel ein Leiter, der die Spannung 10 000 Volt hat und die Elektrizitätsmenge 100 Mikrocoulomb enthält, besitzt eine Energie von 0,5 Volt-Coulomb, kann also eine ebenso große Arbeit leisten. (Dieser Leiter muß natürlich die Kapazität 0,01 Mikrofarad haben.) Verbindet man z. B. diesen Leiter durch einen Draht mit der Erde, so kommt er auf die Spannung Null, er wird entladen, seine ganze Energie geht durch den Draht und erzeugt, wie wir gesehen haben, in diesem Wärme. Die erzeugte Wärmemenge entspricht also dabei gerade der Arbeit von 0,5 Volt-Coulomb.

Nun haben wir oben (S. 16) festgesetzt, daß

$$1 \text{ Volt} \times 1 \text{ Coulomb} = 10 \text{ Millionen Erg} = \frac{1}{9{,}81} \text{ Kilogrammeter}$$

ist. In unserem Beispiel enthält also der Leiter $\frac{0{,}5}{9{,}81}$ = etwa 0,051 Kilogrammeter Energie, d. h. es war eine Arbeit von 0,051 Kilogrammetern nötig, um ihn zu laden, und dieselbe Arbeit kann der geladene Leiter auch wieder leisten.

Diese Beziehung zwischen den elektrischen Größen Volt und Coulomb und der mechanischen Arbeitseinheit Kilogrammeter ist deswegen wichtig, weil sie sofort erlaubt, die Energie eines Leiters in gewöhnlichem Maß auszudrücken, wenn man nur seine Spannung in Volt und seine Elektrizitätsmenge in Coulomb gemessen hat.

Die gesamte einem Leiter zugeführte Elektrizitätsmenge befindet sich, wenn das Gleichgewicht eingetreten ist, nach dem früher Gesagten auf der Oberfläche und zwar so verteilt, daß die Spannung überall auf dem Leiter dieselbe ist. Wenn das der Fall sein soll, so kann durchaus nicht auf jeder gleichgroßen Stelle der Oberfläche, z. B. auf jedem Quadratmillimeter, die gleiche Elektrizitätsmenge, die gleiche Anzahl von Elektronen, vorhanden sein. Vielmehr wird an den verschiedenen gleichgroßen Stellen der Oberfläche die Elektrizitätsmenge verschieden sein, je nach der Gestalt der Oberfläche. Man nennt die Menge der Elektrizität, welche auf der Einheit der Oberfläche, also etwa auf einem Quadratmillimeter vorhanden ist, die Dichtigkeit der Elektrizität an dieser Stelle. Man kann also sagen, auf einem beliebig geformten elektrisierten Leiter ist die Spannung zwar überall dieselbe, aber die Dichtigkeit der Elektrizität ist im allgemeinen von Punkt zu Punkt verschieden. Je kleiner die Fläche ist, auf der eine bestimmte Elektrizitätsmenge, z. B. 5 Mikrocoulomb, vorhanden ist, desto größer ist also die Dichtigkeit der Elektrizität an dieser Stelle.

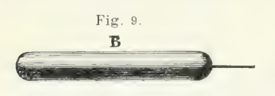
Es läßt sich nun leicht einsehen und auch durch das Experiment leicht beweisen, daß, wenn ein Leiter in eine Spitze ausläuft, daß dann an dieser Spitze die Dichtigkeit der Elektrizität eine außerordentlich große ist, eine ganz bedeutend größere als an jedem anderen Punkte des Leiters. Es kann die gesamte Elektrizitätsmenge auf dem Leiter eine sehr kleine sein, trotzdem ist die Dichtigkeit der Elektrizität auf einer leitenden Spitze eine sehr große, weil eben die Flächengröße einer Spitze außerordentlich klein ist. Diese Eigenschaft der Spitzen zieht nun eine Reihe von wichtigen Folgen nach sich. Je dichter nämlich die Elektronen an der Oberfläche des Leiters beieinander liegen, desto stärker ist naturgemäß die Abstoßung zwischen ihnen. Wenn nun die Abstoßung zwischen diesen Teilchen groß genug wird, wie eben gerade an einer Spitze, so kann dieselbe den Widerstand des Isolators überwinden, und die Folge davon ist, daß die Elektronen sich von der Spitze weg nach außen bewegen müssen, namentlich wenn der angrenzende Isolator die Luft oder ein anderes Gas ist.

An einer Spitze eines geladenen Leiters werden die elektrischen Teilchen nach außen, von dem Leiter weg, getrieben.

Diese Fortbewegung der Elektronen durch die Luft ist in Wirklichkeit immer mit einer Luftströmung verbunden. Man fühlt stets einen Luftstrom, der von einer geladenen Spitze ausgeht und den man als elektrischen Wind bezeichnet. Bewegen sich aber die Elektronen fort, so folgt, daß die Ladung eines Leiters sich verringern muß, wenn man an ihn eine Spitze ansetzt. Auch dies ist der Fall, wie man leicht durch den Versuch beweisen kann. Man nehme einen isolierten Leiter, etwa den Zylinder mit abgerundeten Ecken B (Fig. 9) (an dem man sich

die Spitze noch fortdenken muß) und lade ihn durch eine Elektrisiermaschine. Befestigt man an einer oder mehreren Stellen des Zylinders Streifchen von Blattgold, so divergieren diese bei der Ladung, und die Größe ihrer Divergenz läßt die Spannung des geladenen Zylinders erkennen. Sowie man nun an den geladenen isolierten Leiter eine Spitze ansetzt, so nimmt die Divergenz der Goldblättchen sofort ab und dies beweist, daß seine Spannung geringer geworden ist, also auch seine Ladung, daß also von der Spitze die elektrischen Teilchen fortgeflogen sind.

Fig. 9.



Unsere bisherigen Betrachtungen sind aber nun durch eine neue Tatsache von weitreichendster Bedeutung zu vervollständigen, durch eine Eigenschaft der Elektrizität, die man aus dem Bisherigen nicht vermuten konnte.

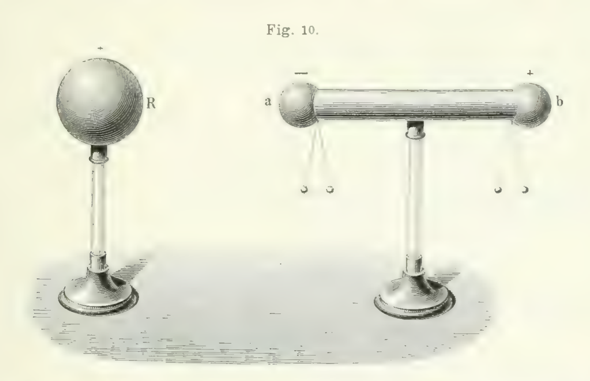
Wenn man ein Goldblattelektroskop aufstellt und eine geriebene Glasstange in die Nähe des Knopfes desselben bringt, so fangen die Goldblättchen schon an zu divergieren, ehe noch der Glasstab den Knopf berührt hat. Hält man den Glasstab in einiger Entfernung von dem Knopf des Elektroskops, so gehen die Goldblättchen auseinander und bleiben so lange divergent, als der Stab in der Nähe gehalten wird. Sowie man den Glasstab fortnimmt, fallen die Goldblättchen wieder zusammen. Die Elektrizität auf dem Glasstab hat also, wie man daraus sieht, die Eigenschaft, durch ihre bloße Nähe auf leitenden Körpern den elektrischen Zustand hervorzurufen. Man bezeichnet diese Wirkung mit dem Namen Influenz. Man sagt, der elektrisierte Körper influenziere auf dem in der Nähe befindlichen Leiter Elektrizität, er erzeuge Influenzelektrizität.

Zwei Unterschiede kann man aber sofort zwischen dem Verhalten eines influenzierten Leiters und eines durch Reibung oder Berührung elektrisierten erkennen. Erstens: Die Influenzelektrizität bleibt auf einem isolierten Leiter nur so lange, als der influenzierende Körper in der Nähe ist. Wird dieser fortgenommen oder wird ihm seine Elektrizität auf irgend eine Weise entzogen, so verschwindet auch sofort die Influenzelektrizität auf dem influenzierten Leiter. Der zweite Unterschied ist folgender: Untersucht man einen influenzierten Leiter daraufhin, von welcher Art die Elektrizität ist, die auf ihm durch Influenz entwickelt ist, so findet man, daß er nicht eine Art Elektrizität enthält, sondern daß auf seiner Oberfläche beide Arten Elektrizität getrennt vorhanden sind, die positive und die negative. Ein Teil der Oberfläche ist positiv, der andere negativ elektrisch, und zwar haben diejenigen Teile der Oberfläche, welche am nächsten an dem influenzierenden Körper sich befinden, immer die entgegengesetzte Art der Elektrizität wie dieser, während die entfernteren Teile dieselbe Art der Elektrizität enthalten. Es sei z. B. (in Fig. 10) R eine positiv elektrische Glaskugel. Bringt man in ihre Nähe den isolierten Leiter a b, so entsteht auf diesem Influenzelektrizität, und zwar wird der links liegende Teil a negativ, während der rechts liegende Teil b positiv elektrisch wird. Wenn die Kugel R negativ elektrisch wäre, so würde auch die Verteilung der Elektrizität auf a b die umgekehrte sein. Man bezeichnet die Elektrizität auf a, also auf den dem

Körper R am nächsten liegenden Teilen, als Influenzelektrizität erster Art, die auf b als Influenzelektrizität zweiter Art. Je mehr man von a aus nach der Mitte geht, desto mehr nimmt die Dichtigkeit der negativen Elektrizität ab; je mehr man von b nach der Mitte geht, desto mehr nimmt die Dichtigkeit der positiven Elektrizität ab. Die Mitte selbst ist unelektrisch. Es sieht so aus, und das ist auch die naheliegende Erklärung für die Erscheinung der Influenz, als ob in dem Leiter a b beide Elektrizitäten vorhanden wären und als ob durch die Annäherung des Körpers R die ungleichnamigen Elektronen von R nach a hin angezogen, die gleichnamigen nach b hin abgestoßen worden wären.

Wenn das Gleichgewicht eingetreten ist, so muß auch hier, wie stets, die Spannung auf dem ganzen Leiter a b überall dieselbe sein. Die Spannung rührt aber her teils von den Kräften, die von R ausgehen, teils von den Kräften der elektrischen Teilchen auf a b selbst.

Fig. 10.



Die beiden Arten von Influenzelektrizität auf einem isolierten Leiter verhalten sich nun durchaus verschieden. Es läßt sich nämlich die Influenzelektrizität zweiter Art (die gleichnamige) zur Erde ableiten, dagegen diejenige erster Art durchaus nicht.

Legt man an das Ende b des Zylinders a b einen leitenden Draht an, der mit der Erde in Verbindung ist, so hat jetzt der ganze Zylinder die Spannung Null. Durch die Influenz des positiven Körpers R wird nun wieder die ungleichnamige negative Elektrizität nach a hingezogen, die positive nach b und dem Draht abgestoßen. Die positive Elektrizität fließt also zur Erde ab. Hebt man nun die Verbindung mit der Erde auf, isoliert man also den Leiter wieder, so bleibt auf a b nur negative Elektrizität übrig. Man kann also die Influenzelektrizität zweiter Art zur Erde ableiten.

Legt man den Draht dagegen an das Ende a des Zylinders an, so ist unser Leiter auch wieder mit der Erde in Verbindung, und auch hier spielt die Erde die Rolle des entferntesten Teils, d. h. die gleichnamige Elektrizität (zweiter Art) geht zur Erde und die negative Elektrizität

bleibt auf dem Leiter. Man kann also die Influenzelektrizität erster Art durchaus nicht zur Erde ableiten.

Wenn man die Influenzelektrizität zweiter Art zur Erde abgeleitet hat und dann den Körper wieder isoliert, so bleibt nur die Influenzelektrizität der ersten Art übrig. Entfernt man nun den Körper R, so kann sich diese nicht mehr mit der entgegengesetzten Elektrizität ausgleichen, da diese ja zur Erde abgeleitet ist, und der Körper bleibt also nun elektrisch (in unserem Falle negativ elektrisch). Wir haben also auf diese Weise ein Mittel erlangt, einem Leiter durch Influenz bleibend Elektrizität einer Art mitzuteilen. Wir berühren ihn mit dem (nassen) Finger, während wir ihn influenzieren. Dadurch wird die Elektrizität zweiter Art (die gleichnamige) zur Erde abgeleitet. Nehmen wir dann den Finger weg, so bleibt die ungleichnamige Elektrizität auf dem Leiter und sie bleibt auch auf ihm nach der Entfernung des influenzierenden Körpers.

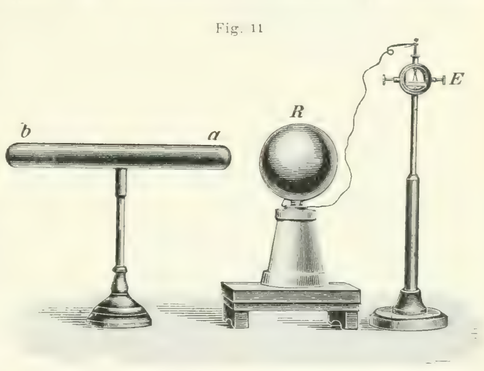
Wir müssen aber die Verhältnisse noch etwas eingehender untersuchen, die sich bei der Influenzwirkung ergeben. Wir hatten bisher angenommen, daß der influenzierende Körper R ein elektrischer Isolator ist, eine Glaskugel z. B., auf welcher die Elektrizität sich nicht verschieben kann. Nimmt man aber als influenzierenden Körper einen geladenen Leiter, der natürlich isoliert sein muß, also z. B. eine elektrisierte Metallkugel, so ist der Vorgang, der nun stattfinden wird, ein etwas verwickelterer, aber auch noch leicht zu übersehen. Die geladene Metallkugel R influenziert auf dem Zylinder a b (Fig. 10) Elektrizität, sie zieht die ungleichnamige nach a, stößt die gleichnamige nach b. Aber auch auf der Metallkugel R muß die Elektrizität verschoben werden, muß sie sich anders verteilen. Die von a b ausgehenden Kräfte wirken ja auf die Elektrizität an der Oberfläche von R ein und verschieben sie, und da in der Nähe von R sich die ungleichnamige Elektrizität bei a befindet, so müssen die Elektronen von R angezogen werden, also sich in größerer Dichtigkeit an der dem influenzierten Körper nächsten Stelle ansammeln. Durch die Anwesenheit des influenzierten Körpers wird also die Dichtigkeit der Elektrizität an jedem Punkte des influenzierenden Leiters geändert. Wir können aber auch sofort noch weiter schließen, daß durch die Anwesenheit des influenzierten Körpers, und namentlich wenn dieser zur Erde abgeleitet ist, die Spannung von R weit kleiner werden muß, als sie ursprünglich war. Denn die Spannung von R (in Volt) ist ja gleich der Arbeit, welche nötig ist, um ein Coulomb (eine positive Elektrizitätseinheit) auf die Kugel R (diese sei positiv elektrisch) zu bringen, von einer Stelle aus, wo die Spannung Null ist, und zwar entgegen den abstoßenden Kräften, die von R ausgehen. Hier in unserem Fall ist aber in der Nähe von R der influenzierte Körper, der zur Erde abgeleitet ist und daher negative Elektrizität enthält. Die Kräfte, die diese negative Elektrizität auf unser Coulomb ausübt, sind aber anziehende, sie ziehen das Coulomb von selbst heran und die Arbeit, die wir aufwenden müssen, um die Kräfte von R zu überwinden, ist also geringer, ein Teil der ganzen Arbeit wird von dem influenzierten Körper übernommen. Es ist also eine viel geringere Arbeit nötig, um 1 Coulomb auf den Körper R zu bringen, d. h. die Spannung der Kugel R ist unter sonst gleichen Umständen kleiner,

wenn der influenzierte und abgeleitete Körper in der Nähe ist.

Also: Wenn einem geladenen Leiter ein anderer Leiter in die Nähe gebracht wird, der zur Erde abgeleitet ist, so verringert sich die Spannung des ersten bedeutend.

Wir können uns davon leicht durch das Experiment überzeugen. Wir verbinden unsere Kugel R (Fig. 11), die der guten Isolation halber auf einen Paraffinklotz gelegt ist, mit einem Exnerschen Elektroskop E und laden die Kugel etwa durch eine Elektrisiermaschine. Das Elektroskop zeigt uns die vorhandene Spannung, sagen wir 1500 Volt, an. Ohne etwas zu ändern, stellen wir nun bloß den Leiter a b, zunächst isoliert, in die Nähe der Kugel. Unser Elektroskop zeigt sofort, daß jetzt bloß noch eine Spannung von 1300 Volt auf der Kugel R herrscht. Und nun verbinden wir unseren Leiter a b dadurch, daß wir den Finger anlegen, mit der Erde. Sofort gehen die Goldblättchen des Elektroskops zurück und bleiben auf etwa 600 Volt stehen, ein Beweis, wie erheblich die Spannung unserer Kugel durch die Anwesenheit des influenzierten Körpers gesunken ist.

Fig. 11

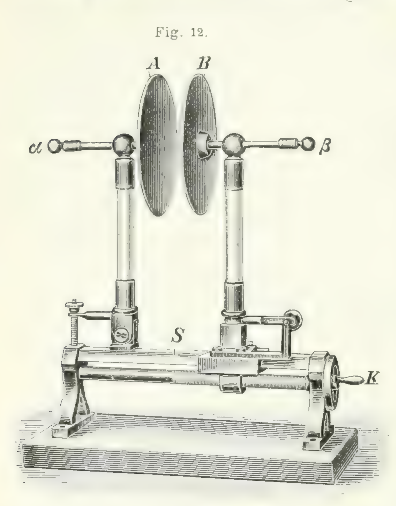


Unsere Kugel R hat dieselbe Elektrizitätsmenge behalten, es ist ihr nichts zugeführt und nichts entzogen worden. Aber wir sehen jetzt, daß durch die bloße Anwesenheit des influenzierten und mit der Erde verbundenen Körpers ihre Spannung geringer geworden ist. Das Verhältnis zwischen der Elektrizitätsmenge eines Leiters und seiner Spannung nannten wir aber die Kapazität des Leiters. Dieses Verhältnis ist also nun größer geworden, da die Spannung kleiner wurde, d. h. durch die bloße Anwesenheit eines influenzierten und abgeleiteten Körpers wird die Kapazität eines Leiters bedeutend vergrößert. Daraus folgt, daß man unserem Leiter jetzt mehr Elektrizität zuführen kann als früher, bis er dieselbe Spannung hat. Er kann also bei derselben Spannung wie früher jetzt stärker geladen sein.

Diese Möglichkeit, die Kapazität und dadurch die Ladung eines Leiters zu vergrößern, ist von großer Wichtigkeit. Man hat schon im 18. Jahrhundert einen darauf beruhenden Apparat konstruiert, den Ansammlungsapparat oder Kondensator, welcher in Fig. 12 abgebildet ist. Er besteht aus zwei Metallplatten A und B, die auf Glassäulen befestigt und daher

isoliert sind und die einander gerade gegenüberstehen. Die Platte A mit ihrer Säule ist fest, die Platte B mit ihrer Säule kann durch Drehung der Kurbel K verschoben und in beliebigen Abstand von A gebracht werden.

Fig. 12.



Ist die Platte B sehr weit von der Platte A und verbindet man die Platte A mit dem Konduktor einer Elektrisiermaschine, so wird A so lange geladen, bis ihre Spannung gleich der des Konduktors der Maschine ist. Weiter läßt sich die Ladung nicht treiben. Bringt man aber der Platte A jetzt die zur Erde abgeleitete Platte B nahe gegenüber, so haben wir gesehen, daß dadurch die Spannung von A erheblich kleiner wird, als sie war. Infolgedessen geht jetzt von der Elektrisiermaschine wieder neue Elektrizität auf A über, bis die Spannung von A wieder gleich der der Elektrizitätsquelle geworden ist. Es hat also A viel mehr Elektrizität aufgenommen, als es ohne die Anwesenheit von B hätte aufnehmen können.

Man nennt die Platte A die Kollektorplatte, die Platte B die Kondensatorplatte. Die Klemmen α und β dienen zum Einschalten der Drähte, durch welche A mit der Elektrisiermaschine, B mit der Erde verbunden werden. Der abgebildete Kondensator wird als Kohlrauschscher Kondensator bezeichnet. Die Kollektorplatte hat also eine viel größere Kapazität, sie kann eine größere Elektrizitätsmenge aufnehmen, wenn die zur Erde abgeleitete Kondensatorplatte ihr nahe gegenübersteht, als wenn sie entfernt steht. Man bezeichnet die Kapazität der Kollektorplatte, wenn die Kondensatorplatte ihr gegenübersteht und zur Erde abgeleitet ist, kurz als die Kapazität des Kondensators. Die Kapazität eines Kondensators ist also das Verhältnis zwischen der Elektrizitätsmenge, die auf der Kollektorplatte liegt, zu der Spannung derselben, falls die Kondensatorplatte zur Erde abgeleitet ist.

Die Kapazität eines Kondensators hängt von verschiedenen Umständen ab. Sie hängt ab von der Größe der Fläche der leitenden Körper, also in unserem Falle der Platten; sie hängt wesentlich davon ab, in welcher Entfernung die beiden Platten einander gegenüberstehen. Die Kapazität ist um so größer, je geringer diese Entfernung ist. Aber die Kapazität hängt auch wesentlich davon ab, welches das isolierende Medium zwischen den beiden Platten ist. Wir haben stillschweigend angenommen, daß zwischen den beiden Platten sich Luft befindet. Ist aber das isolierende Medium nicht Luft, sondern ein

anderer Isolator, Glas, Kautschuk, Schwefel u. s. f., so ist die Kapazität eine andere und zwar immer eine größere. Es beruht das auf der Entdeckung von Faraday, von der wir schon oben S. 10 gesprochen haben. Da nämlich die Coulombschen Anziehungs- und Abstoßungskräfte in jedem isolierenden Körper kleiner sind als in Luft, so ist auch die Spannung eines geladenen Leiters, wenn er etwa von Petroleum umgeben ist, bei gleicher Ladung, kleiner, als wenn er von Luft umgeben ist. Da nun aber die Kapazität allgemein gleich der Ladung dividiert durch die Spannung ist, so sieht man, daß die Kapazität eines Leiters oder Kondensators, wenn er von Petroleum umgeben ist, größer ist, als wenn er von Luft umgeben ist, und zwar so vielmal größer, als die Coulombsche Kraft in Petroleum kleiner ist als in Luft. Die Isolatoren spielen also, und das ist von besonderer Wichtigkeit, eine wesentliche Rolle bei der elektrischen Influenz. Man bezeichnet deshalb einen Isolator auch als Dielektrikum. Diese beiden Bezeichnungen bedeuten dasselbe. Das eine Mal hebt man nur die Fähigkeit zu isolieren hervor, das andere Mal die Fähigkeit, auf die elektrische Verteilung einen Einfluß zu üben.

Wenn man einen Kondensator nimmt und den Zwischenraum einmal mit Luft, das zweite Mal mit einem anderen Dielektrikum, z. B. Glimmer oder Glas oder Schwefel, ausfüllt, so ist die Kapazität des Kondensators das zweite Mal größer als das erste Mal. Ist sie dann z. B. 8- oder 6- oder 3,9mal so groß wie das erste Mal, so sagt man, das betreffende Dielektrikum besitzt die Dielektrizitätskonstante 8 oder 6 oder 3,9. Man versteht also unter der Dielektrizitätskonstante eines Dielektrikums das Verhältnis der Kapazität eines Kondensators, wenn er das betreffende Dielektrikum als Zwischenschicht enthält, zu der Kapazität desselben Kondensators, wenn er Luft als Zwischenschicht enthält. So hat man experimentell folgende Dielektrizitätskonstanten gefunden:

Dielektrizitätskonstanten.

Paraffin	2,3	Glimmer	8,0
Kautschuk	2,9	Glas (je nach der Sorte)	6—10
Ebonit	2,6	Öle („ „ „ „)	2—5
Schwefel	3,9	Gase	1

Auf die hervorragende theoretische Wichtigkeit dieser dielektrischen Eigenschaften der Isolatoren kommen wir bald zurück.

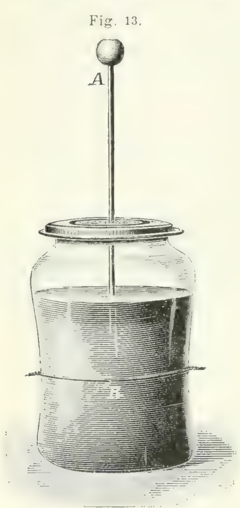
Die festen Isolatoren, Glas, Kautschuk, Schellack u. s. w., haben, als Zwischenschicht in einem Kondensator gebraucht, noch einen weiteren Vorteil. An den beiden einander gegenüberstehenden Flächen eines Kondensators befinden sich ja Elektrizitäten von entgegengesetzter Art und zwar in großer Dichte. Je dichter nun die Elektrizität an einer Stelle ist, desto größer ist, wie wir wissen, die Kraft, welche sie nach außen treibt. Die beiden entgegengesetzten Elektrizitäten auf den beiden Platten können daher den Widerstand der Luft überwinden und sich in Form eines elektrischen Funkens ausgleichen. Die Anhäufung der Elektrizität wird dadurch illusorisch gemacht. Ist aber das Dielektrikum ein fester Körper, wie Glas, so ist der Widerstand, der dem Ausgleich der Elektrizitäten entgegengesetzt wird, ein viel größerer; diese können sich im allgemeinen nicht gewaltsam

ausgleichen, sondern bleiben auf den beiden Leiterflächen. Will man deshalb einen Ansammlungsapparat stark laden, so muß man als isolierende Zwischenschicht, als Dielektrikum, einen festen Körper, Paraffin, Papier, Glimmer oder Glas, nehmen.

Der oben (S. 19) beschriebene Apparat, welcher $^{1}/_{10}$ Mikrofarad enthielt, ist auch nichts anderes als ein Kondensator. Die beiden Stanniolflächen sind die Belegungen, das mit Paraffin getränkte Papier ist die dielektrische (isolierende) Zwischenschicht. Für exakte Messungen nimmt man nicht Papier, sondern Glimmer als dielektrische Zwischenschicht.

Die zweckmäßigste und am meisten benutzte Form für einen Ansammlungsapparat ist die der Leydener Flasche, deren Prinzip nach dem Gesagten sofort zu übersehen ist. Sie besteht (Fig. 13) aus einer Flasche aus Glas in Form der gewöhnlichen Einlegegläser. Dieses Glas ist außen und innen bis zu etwa $^{2}/_{3}$ seiner Höhe mit Stanniolpapier, einem leitenden Körper, beklebt. Diese beiden Stanniolpapierplatten, die man die Belegungen der Flasche nennt, vertreten die Stellen unserer Platten A und B in Fig. 12. Das Glas ist das Dielektrikum. Man braucht nun bloß die eine Belegung als Kollektorplatte mit einer Elektrisiermaschine, die andere mit der Erde in leitende Verbindung zu setzen, um auf der Kollektorplatte sehr viel Elektrizität anzuhäufen, sie sehr stark zu laden, viel stärker, als es möglich wäre, wenn diese Platte allein stände.

Fig. 13.

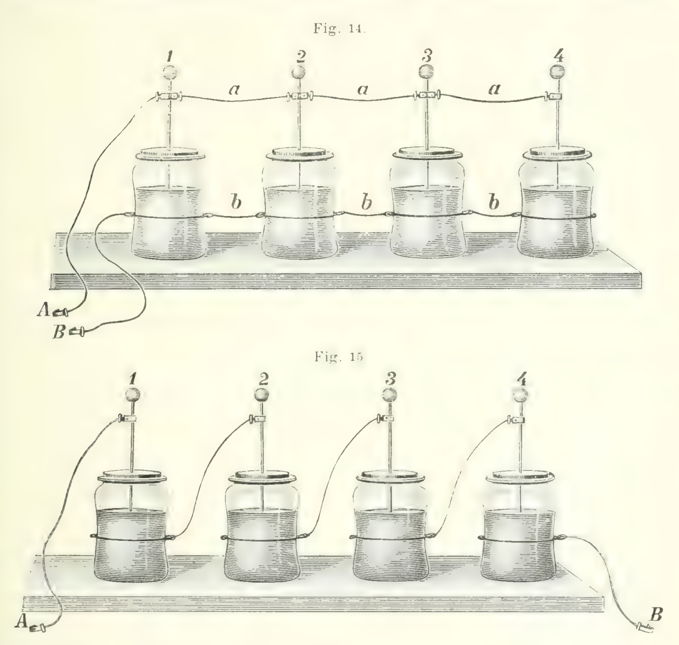


Um diese Verbindung herzustellen, trägt die Glasflasche einen Holzdeckel, durch welchen ein Metallstab mit einem Knopf gesteckt ist. Der Metallstab berührt die innere Belegung. An der äußeren Belegung dient ein herumgelegter Draht mit Öse zur Verbindung. Indem man den Knopf dieses Stabes mit dem Konduktor einer Elektrisiermaschine in leitende Verbindung setzt, und ebenso die äußere Belegung mit der Erde verbindet (am einfachsten dadurch, daß man die Flasche an der äußeren Belegung in der Hand hält), kann man die Flasche durch Drehen der Elektrisiermaschine sehr stark laden. Hat man den Knopf der Flasche mit dem positiven Konduktor der Elektrisiermaschine in Verbindung gesetzt, so wird die innere Belegung positiv elektrisch, die äußere negativ elektrisch, da die Influenzelektrizität der zweiten Art zur Erde abgeleitet wird. Ist der Knopf mit dem negativen Konduktor in Verbindung, so sind die Ladungen der beiden Belegungen die entgegengesetzten.

Die Elektrizitätsmenge, die eine Flasche aufnehmen kann, ist um so größer, je größer ihre Kapazität ist, und die Kapazität einer Flasche ist eine um so größere, je größer ihre Belegungen und je geringer die Entfernung der Stanniolplatten ist, also je dünner das Glas der Flasche ist.

Um also sehr viel Elektrizität anzusammeln, muß man das Glas sehr

dünn — wobei man aber wegen der Zerbrechlichkeit praktisch bald zu einer Grenze kommt — und die Belegungen sehr groß machen. Das letztere kann man aber einfacher erreichen, wenn man nicht eine, sondern mehrere Flaschen nimmt. Wenn man eine Reihe von Leydener Flaschen nimmt und alle inneren Belegungen miteinander verbindet, während man alle äußeren zur Erde ableitet, so entspricht dieses System einer einzigen Flasche mit sehr großen Belegungen. Alle inneren Stanniolflächen bilden zusammen eine große Stanniolfläche, ebenso alle äußeren. Man kann also, was eigent-



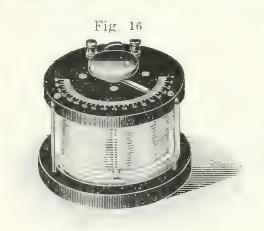
lich selbstverständlich ist, in einer B a t t e r i e von 4 Leydener Flaschen, deren innere Belegungen alle leitend verbunden sind, 4mal so viel Elektrizität anhäufen als in einer einzigen. Eine solche Batterie von 4 Flaschen zeigt Fig. 14. Die äußeren Belegungen sind durch Metallschnüre b b, die inneren durch Metallschnüre a a . . je miteinander verbunden. Die Drahtschnur A wird zur Elektrisiermaschine geführt, die Drahtschnur B zur Erde, indem man sie etwa mit einem Gasrohr oder Wasserleitungsrohr des Hauses verbindet. Man sagt auch von einer so verbundenen Reihe von Flaschen, sie seien p a r a l l e l g e s c h a l t e t.

Man kann aber eine Reihe von Flaschen auch noch anders verbinden, nämlich so, wie es in Fig. 15 gezeichnet ist. Dabei ist die äußere Belegung der ersten Flasche mit der inneren der zweiten, deren äußere mit der

inneren der dritten verbunden u. s. w. Die innere Belegung der ersten Flasche wird durch eine Drahtschnur A mit der Elektrisiermaschine, die äußere Belegung der letzten Flasche durch eine Drahtschnur B mit der Erde verbunden. Eine solche Reihe von Flaschen nennt man hintereinander geschaltet. Hier sind die Verhältnisse ganz anders, die ganze Batterie hat nämlich nur ein Viertel der Kapazität jeder einzelnen Flasche. In der Tat, wenn hier der inneren Belegung der ersten Flasche von der Elektrisiermaschine eine gewisse Menge positiver Elektrizität zugeführt wird, so wird die gleiche Menge negativer Elektrizität auf ihrer äußeren Belegung bleiben, während die gleiche Menge positiver Elektrizität als Influenzelektrizität zweiter Art nach 2 abgestoßen wird und also die innere Belegung der zweiten Flasche ladet. In derselben Weise geht das weiter. Es ist also immer dieselbe Elektrizitätsmenge, welche in jeder Flasche sich befindet. Da nun aber der Spannungsunterschied an den Enden der ganzen Batterie viermal so groß ist, als an den beiden Belegungen je einer Flasche, so ist die Kapazität der Batterie bloß der vierte Teil von der Kapazität einer einzelnen Flasche. Wir entnehmen daraus die Regel, die wir später benutzen werden: Durch Parallelschalten von Kondensatoren wird die Kapazität vergrößert, durch Hintereinanderschalten verkleinert.

Für manche Zwecke benötigt man Kondensatoren, deren Kapazität innerhalb gewisser Grenzen stetig geändert werden kann. Solche variable Kondensatoren (Fig. 16) werden von verschiedenen Firmen in der Weise konstruiert, daß in einem Glasgefäß mit Ebonitdeckel und Ebonitboden eine Anzahl fester halbkreisförmiger Messingplatten in gleichem Abstand voneinander angebracht sind, und daß mitten zwischen diese ein System von halbkreisförmigen Messingplatten, die zusammen an einer Achse befestigt sind, durch Drehung der Achse mehr oder minder hineingeschoben werden kann. Die festen Platten sind parallel verbunden, ebenso die beweglichen, die einen werden mit dem einen Pol der Maschine, die anderen mit dem anderen Pol oder der Erde verbunden. Sind die beiden Plattensysteme ganz ineinander geschoben, so ist die Kapazität die größte, liegen sie ganz außer einander, die kleinste. Ein Zeiger, der an der Achse befestigt ist, und vor einer Skala sich bewegt, gibt die Stellung an. Für gewöhnlich benutzt man Luft als Dielektrikum; für höhere Spannungen aber kann man das Gefäß auch mit Paraffinöl füllen. Da der Abstand der Plattensysteme mechanisch nicht sehr klein gemacht werden kann, so ist die gesamte maximale Kapazität dieser variablen Kondensatoren keine sehr große, sie beträgt bloß kleine Bruchteile von einem Mikrofarad. Man drückt die Kapazität solcher kleiner Kondensatoren auch gewöhnlich nicht in Mikrofarad aus, sondern in einem anderen Maße, welches von dem von uns gebrauchten abweicht, nämlich dem elektrostatischen (S. 9). In diesem wird die Kapazität als eine Länge gemessen und die Kapazität eines Mikrofarads ist gleich 900000 Zentimeter. Man bezeichnet deswegen

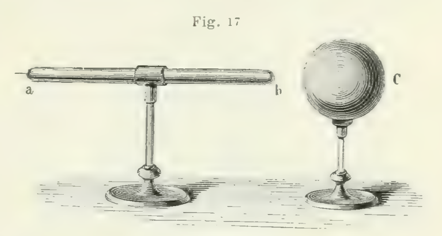
Fig. 16



häufig sehr kleine Kapazitäten in Zentimetern. Unser oben gezeichneter variabler Kondensator hat eine Kapazität, die von 0 bis 0,002 Mikrofarad variiert, also in dem eben angeführten Maß zwischen 0 und 1800 cm.

Zum Verständnis einiger Vorrichtungen, die im folgenden besprochen werden sollen, müssen wir nun die Wirkung einer Spitze an einem influenzierten Leiter untersuchen. Enthält ein influenzierter Leiter a b (Fig. 17) eine Spitze an der Stelle a, welche von dem influenzierenden Körper C abgewendet ist, so wird auf der Spitze die Influenzelektrizität zweiter Art erregt, und da die Dichtigkeit auf einer Spitze, wie oben ausgeführt, außerordentlich groß ist, strömen die elektrischen Teilchen dort von der Spitze fort. Der Leiter a b behält also die Influenzelektrizität der ersten Art.

Fig. 17

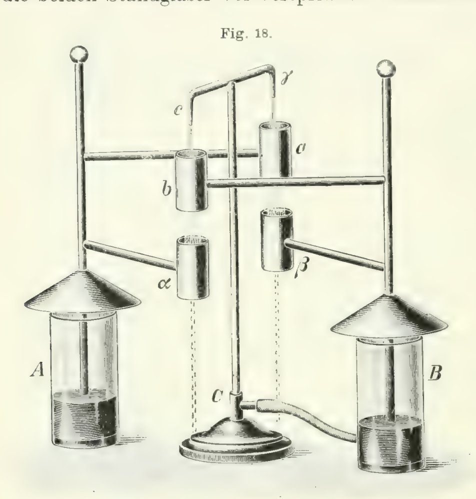


Ebenso hat, wenn die Spitze an der Stelle b angebracht ist, an welcher sich die Influenzelektrizität der ersten Art sammelt, an ihr diese Elektrizität die größte Dichtigkeit. Sie strömt daher aus und es bleibt auf a b nur Influenzelektrizität der zweiten Art (die gleichnamige) übrig. Zugleich aber wird auch auf der Kugel C die Dichtigkeit am größten an derjenigen Stelle der Kugel, welche der Spitze gerade gegenüberliegt (S. 24). Diese starke Erhöhung der Dichtigkeit bewirkt aber auch an der Kugel, ebenso wie an der Spitze, ein Ausströmen der Elektrizität. Nimmt man nun die Spitze aus der Nähe von C fort, so enthält C weniger Elektrizität als früher, während a b gleichnamig geladen ist. Es sieht also so aus, als ob die Spitze aus dem Leiter C Elektrizität herausgesaugt hätte. Man bezeichnet diese Wirkung der Spitzen auch als Saugwirkung, wobei aber natürlich an ein Saugen gar nicht zu denken ist. Diese Wirkung der Spitzen wurde bei der Reibungselektrisiermaschine, die wir oben beschrieben haben, benutzt. Dort war der Konduktor der Maschine mit einem Ring verbunden, an welchem Spitzen der rotierenden Glasscheibe gegenüberstanden. Durch diese Spitzen wird der Konduktor mit der Influenzelektrizität derselben Art geladen, welche auf der Glasscheibe durch Reiben entwickelt wird, mit positiver.

Ebenso wie man eine Maschine konstruieren konnte, welche durch Reibung große Mengen Elektrizität entwickeln konnte, ebenso lag der Gedanke nahe, eine Maschine zu konstruieren, die durch Influenz Elektrizität in großen Mengen erzeugt oder, wie wir besser sagen, positive und negative Ladungen in großen Mengen trennt. Denn die Ladungen, die Elektronen, sind in dem Körper schon vorhanden, der Vorgang der Elektrisierung besteht nur in einer Trennung der positiven und negativen Elektronen. Die Wirkungsweise dieser Maschinen, Influenzmaschinen, beruht darauf, daß Ursache und Wirkung sich bei ihnen fortwährend verstärken, wodurch die Maschinen zu einer sehr großen Leistungsfähigkeit kommen.

Am übersichtlichsten ist diese gegenseitige Verstärkung von Ursache und Wirkung bei einer Maschine zu erkennen, welche von dem genialen englischen Physiker Lord Kelvin konstruiert wurde und welche zwar nicht die Aufgabe hat, große Leistungen zu erzeugen, sondern welche eben nur das Prinzip am einfachsten hervortreten läßt. Es ist das die sogenannte Wasserinfluenzmaschine, welche in Fig. 18 abgebildet ist und bei welcher es ein Wasserstrahl ist, der influenziert wird. In zwei wohlisolierenden Gläsern A und B stehen zwei Metallstangen, welche je zwei metallische Hohlgefäße tragen, die eine a und α, die andere b und β. Außerdem tragen sie noch je einen dachartigen Ansatz, um die beiden Standgläser vor verspritztem Wasser zu schützen. Die beiden Systeme werden so gestellt, daß b senkrecht über α, a senkrecht über β steht. In α und β sind trichterförmige Ansätze angebracht, um das auffallende Wasser aufzunehmen. Zwischen beiden Systemen befindet sich ein Standrohr C, in welchem von einer Wasserleitung Wasser aufsteigt, welches durch die Öffnungen c und γ ausfließt. Wenn man nun etwa das System A durch Berühren mit einem geriebenen Glasstab positiv ladet, so wird der aus γ ausfließende Wasserstrahl beim Durchströmen durch A influenziert. Seine Influenzelektrizität zweiter Art (die positive) strömt durch das Wasserleitungsrohr zur Erde ab, der Strahl selbst bleibt also negativ geladen und macht beim Auftreffen auf β dieses negativ. Dadurch wird zugleich auch b negativ elektrisch und daher wird der aus c ausfließende Wasserstrahl beim Durchströmen durch b positiv und gibt seine positive Elektrizität beim Auftreffen an α ab. Dadurch wird nun aber auch a, das zunächst positiv geladen war, stärker positiv und damit wieder β und b stärker negativ und so schraubt sich die Wirkung durch Verstärkung der Ursache von selbst immer weiter in die Höhe. Solange der Wasserstrahl fließt, solange wird das System A immer von neuem positiv, das System B negativ geladen und man kann dauernd die so geschiedenen Elektrizitätsmengen aus der Maschine abnehmen.

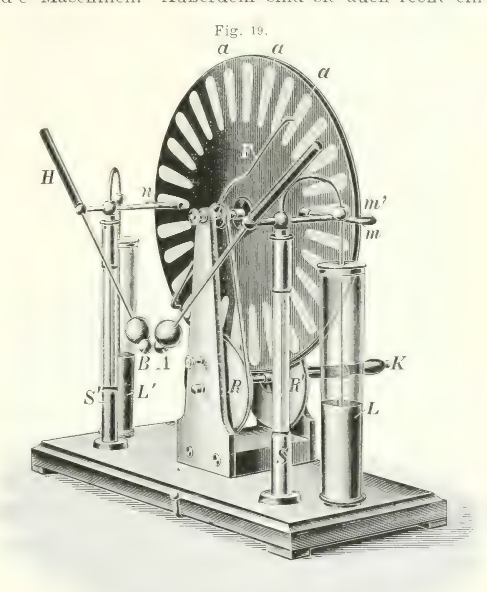
Fig. 18.



In verschiedenen Formen ist dasselbe Prinzip bei allen praktisch benutzten Influenzmaschinen angewendet. Solche Maschinen wurden

zuerst von Holtz und von Töpler in äußerst sinnreicher Weise konstruiert und ihre Maschinen sind noch heute in Gebrauch. Sie werden aber jetzt immer mehr und mehr verdrängt durch eine andere Art von Influenzmaschinen, die Wimshurstmaschinen, obwohl Wimshurst nichts prinzipiell Neues an diesen Maschinen geleistet hat, sondern alles Wesentliche von Holtz und Töpler schon gegeben war. Diese Maschinen haben den Vorzug, daß sie keine Erregung von außen brauchen, sondern von selbst angehen, sobald man sie dreht. Es sind selbsterregende Maschinen. Außerdem sind sie auch recht einfach, ziemlich unverwüstlich und von der Feuchtigkeit der Luft nicht sehr abhängig. Die Ansicht einer Wimshurstmaschine ist in Fig. 19 gegeben.

Fig. 19.



Die Maschine enthält zwei Scheiben aus Glas oder Ebonit, welche 5 mm Abstand voneinander haben. Beide Scheiben werden zugleich gedreht und zwar im entgegengesetzten Sinne, die vordere z. B. wie der Uhrzeiger, die hintere entgegengesetzt. Dies wird einfach dadurch bewirkt, daß die Schnur von den Kurbelrädern R und R′ auf die Achse der vorderen Scheibe direkt, auf die Achse der hinteren gekreuzt gelegt ist. Auf jede Scheibe sind eine Anzahl Metallsektoren a, a, a von der Form wie in der Figur aufgeklebt. Die beiden Scheiben laufen rechts und links innerhalb je einer Metallgabel m m′ und n, welche den Scheiben gegenüber mit Spitzen versehen sind. Von diesen Gabeln gehen noch Messingstangen aus, welche von den Glasfüßen S und S′ gehalten werden und welche durch die verschiebbaren Stangen in den Polkugeln A und B, den Konduktoren, endigen. Endlich hat die Maschine als wesentlichen Teil noch auf jeder Seite einen Ausgleicher F (den hinteren, der senkrecht zu F steht, sieht man nicht). Dieser besteht aus einem Metallarm, dessen Enden durch weiche Pinsel aus Metalldraht gebildet sind, die auf den Sektoren a, a . . schleifen.

Wird die Maschine gedreht, so entwickelt sich sofort Elektrizität, die zwischen A und B in Funken oder Büscheln übergeht. Die Ausgleicher sind etwa um 50° gegen die Spitzenkämme geneigt. Die Spitzenkämme und die mit ihnen verbundenen Polkugeln können noch, wie in der Figur, mit Leydener Flaschen L und L′ (d. h. mit deren innerer Belegung) verbunden werden.

Der Vorgang in der Maschine wird am besten aus der schematischen Fig. 20 erkannt werden. In dieser ist die eine Scheibe mit ihren Sektoren als der innere Kreis B B′, die andere Scheibe mit ihren Sektoren als der äußere Kreis D D′ dargestellt. Der Ausgleicher am inneren Kreis mit den Pinseln ist mit a b, der am äußeren Kreis mit c d bezeichnet. Die Spitzenkämme sind vorläufig nicht gezeichnet. Die Wirkung der Maschine läßt sich vollständig erklären, wenn wir nur die Vorgänge an den Metallsektoren ins Auge fassen, diejenigen in dem Ebonit zunächst nicht berücksichtigen. Die gleichzeitige entgegengesetzte Drehung der beiden Scheiben

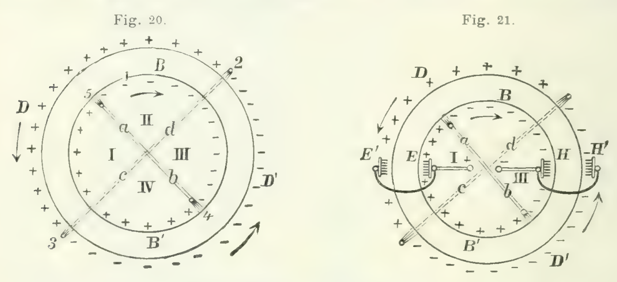
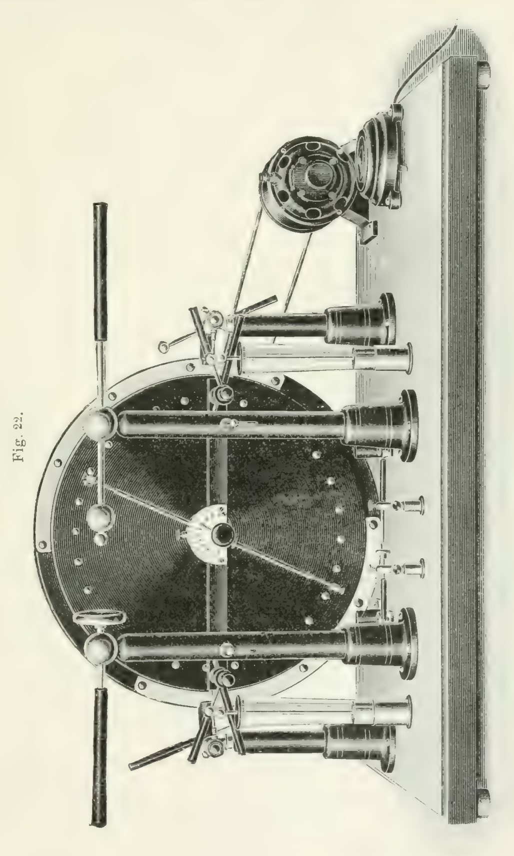


Fig. 20. Fig. 21.

fassen wir hier als successive Drehung bald der einen, bald der anderen Scheibe auf.

Es möge nun der Sektor 1 des inneren Kreises aus irgend einem Grunde Elektrizität, etwa negative, besitzen. Gewöhnlich hat er diese noch von dem letzten Gebrauch der Maschine her, da er isoliert ist, behalten. Der innere Kreis werde rechts herumgedreht, während der äußere zunächst stillsteht. Der Sektor 1 passiert nun eine Reihe Sektoren des äußeren Kreises, die isoliert sind, und influenziert beim Vorübergehen jedesmal zwar in ihnen die beiden Elektrizitäten, die sich aber sofort wieder vereinigen, sobald Sektor 1 an ihnen vorüber ist. Sowie aber Sektor 1 an dem Sektor 2 des äußeren Kreises vorbeipassiert, der gerade von dem Ausgleicher d c berührt wird, wird auf 2 die positive Elektrizität entwickelt und die negative wird auf den damit durch den metallischen Ausgleicher verbundenen Sektor 3 abgestoßen. Nun dreht sich aber auch der äußere Kreis. Im nächsten Moment sind also 2 und 3 nicht mehr verbunden, sondern 2 behält seine positive, 3 seine negative Elektrizität. Nun dreht sich der äußere Kreis links herum weiter. Sobald 3 gegenüber 4 kommt, influenziert es dort positive und stößt die negative Elektrizität nach 5 ab. Zugleich influenziert 2 bei 5 die negative und stößt die positive Elektrizität nach 4 ab. Das Resultat ist also, daß der Sektor 4 positiv geladen ist und 5 negativ. Nun drehen sich wieder 4 und 5, und 5 hat

die Funktion wie im Anfang 1. So geht das fort. Das Resultat ist eine Ladung der Sektoren auf der inneren und äußeren Scheibe, wie sie durch die Zeichen + + und — — angegeben ist. Man sieht, daß mitten zwischen den Ausgleichern rechts beide Scheiben negative, links positive Sektoren haben. Bringt man also da je einen Spitzenkamm, der mit einer Kugel verbunden ist, an, wie es Fig. 21 zeigt, so wird der linken Kugel fortwährend positive, der rechten fortwährend negative Elektrizität zugeführt.


Fig. 22.

Wie bei der Wasserinfluenzmaschine findet also auch hier eine fortwährende Verstärkung von Ursache und Wirkung statt. Während aber bei jener der bewegliche Wasserstrahl sowohl die Rolle des influenzierten Körpers spielt, wie auch des Übertragers der influenzierten Elektrizität auf die festen Leiter, sind es hier die beweglichen Sektoren, welche influenziert werden und die Funktion des Übertragers wird von dem Ausgleicher übernommen.

Die Wimshurstmaschine ist in der letzten Zeit durch einige wesentliche Konstruktionsänderungen zu außerordentlich gesteigerter Leistungsfähigkeit gebracht worden, nämlich in der Starkstrominfluenzmaschine von Wehrsen in Berlin. Bei dieser Maschine, deren äußere

Ansicht Fig. 22 gibt, ist die eine Scheibe fest, die andere drehbar (mit der Hand oder durch einen kleinen Motor, wie in der Figur). Die wesentliche Änderung besteht darin, daß die Sektoren nicht auf die Scheiben aufgeklebt sind, sondern in das Innere der Scheiben verlegt sind, wo sie in das Ebonit einvulkanisiert sind. Sie bestehen aus wellenförmig gebogenen Metallstreifen. Die Maschine besitzt nur einen Ausgleicher, den man in der Figur sieht und der an einer Skala in die richtige Lage eingestellt werden kann. Die ganze Maschine ist kräftig gebaut, so daß sie hohe Tourenzahlen annehmen kann. Bei gleicher Größe leistet sie etwa das Vierfache wie eine gewöhnliche Wimshurstmaschine. Statt zweier Polkugeln besitzt sie eine Kugel und eine Platte, welche auf festen Ebonitsäulen gegeneinander verschiebbar angebracht sind.

Sind diese Influenzmaschinen in Tätigkeit, dann wird bald die Elektrizitätsmenge und infolgedessen die Dichtigkeit der Elektrizität auf den Konduktoren so groß, daß es nicht mehr nötig ist, sie zusammenzuhalten. Es findet dann von selbst, durch die Luft, ein fortwährender Übergang der Elektrizität von dem positiv geladenen Konduktor zum negativ geladenen statt. Wenn man die Kugeln oder Kugel und Platte nämlich voneinander entfernt, so strömen die elektrischen Teilchen vermöge ihrer großen Dichte von ihnen fort und transportieren ihre Ladungen durch die Luftschicht hindurch, so daß sie sich ausgleichen. Dieses Ausströmen ist mit einer sanften Lichterscheinung verbunden. Im Dunkeln sieht man von den beiden Konduktoren mildleuchtende blaue oder violette Strahlen ausgehen, und zwar in Form eines Strahlenbüschels. Man nennt dieses Licht das elektrische Büschellicht. Zugleich hört man dabei einen sausenden, zischenden Ton. Den Vorgang selbst nennt man Büschelentladung.

Man kann übrigens den Ausgleich der Elektrizitäten auch in anderer Form als der des Büschellichts vor sich gehen lassen. Wenn man nämlich die beiden Konduktoren zu Knöpfen zweier Leydener Flaschen macht, wie das in Fig. 19 an beiden Kugeln gezeichnet ist (in Fig. 22 kann man durch Hebel die Konduktoren mit den Knöpfen der beiden Leydener Flaschen nach Belieben verbinden), dann werden durch das Drehen der Influenzmaschine die beiden Flaschen und mit ihnen die Konduktoren sehr stark geladen, ohne daß ein kontinuierlicher Ausgleich der Elektrizität zwischen den Konduktoren stattfindet. Dabei wächst auch der Spannungsunterschied zwischen den Konduktoren allmählich an. Wenn dieser aber eine gewisse Größe erreicht hat, die für jede Entfernung der beiden Konduktoren eine ganz bestimmte ist, dann wird die Luft von den Elektrizitäten gewaltsam durchbrochen. Die positive Elektrizität auf dem einen Konduktor und die negative auf dem anderen ziehen sich gewaltsam an, und es springt zwischen den beiden Konduktoren unter knatterndem Geräusch ein elektrischer Funke über. Dreht man die Influenzmaschine immer weiter, so wird wieder der eine Konduktor positiv, der andere negativ elektrisch mit sehr großer Dichtigkeit, und allmählich überwindet wieder die Kraft zwischen ihnen den Widerstand der Luft, und so springen von Zeit zu Zeit Funken zwischen den beiden Konduktoren über. Nach jedem Überspringen eines Funkens sind die beiden Konduktoren zum Teil entladen, indem ihre entgegengesetzten Elektrizitäten sich zum

Teil ausgeglichen haben. Man nennt diesen Vorgang eine plötzliche oder disruptive Entladung oder Funkenentladung.

Ganz derselbe Vorgang findet übrigens statt, wenn man nicht zwei von vornherein entgegengesetzt elektrische Leiter hat, die einander gegenüberstehen, sondern wenn man einem geladenen elektrischen Leiter einen anderen unelektrischen immer näher bringt. Auf dem unelektrischen Leiter wird Influenzelektrizität erzeugt, und wenn er nahe genug an den ersten geladenen Leiter herangekommen ist, so haben die beiden einander gegenüberliegenden Elektrizitäten, die ja von entgegengesetzter Art sind, solch große Dichtigkeiten erlangt, daß sie den Widerstand der Luft gewaltsam überwinden. Es springt also auch hier ein elektrischer Funke über. Darauf beruht es, daß, wenn man einem geladenen Leiter ein Fingergelenk nähert, ein Funke überspringt, der einen geringen stechenden Schmerz im Finger verursacht.

Wir sind hier schon zu einem neuen Erscheinungsgebiet der Elektrizität vorgedrungen. Unsere ersten Betrachtungen bezogen sich alle auf diejenigen Vorgänge, bei denen die Elektrizität im Gleichgewicht, in Ruhe ist. Jetzt behandeln wir bereits den Übergang der Elektrizität von einem geladenen Leiter zu einem anderen, also die Bewegung der Elektrizität. Von diesen Erscheinungen, die später ausführlich behandelt werden, sollen hier nur kurz zwei angegeben werden, die uns zunächst von Nutzen sein werden.

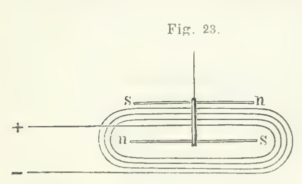
Wenn man die beiden Kugeln unserer Maschine oder überhaupt zwei entgegengesetzt geladene Leiter durch einen metallischen, leitenden Draht miteinander verbindet, so geht der Ausgleich der Elektrizitäten nicht mehr durch die Luft vor sich, sondern durch den Draht, da ja die Elektrizität auf Metallen sich mit der allergrößten Leichtigkeit verschiebt. Es geht also von dem positiven Leiter, auf dem die Elektrizität höhere Spannung besitzt, die positive Elektrizität längs des Drahtes auf den negativen Leiter über, auf dem die Spannung geringer ist, bis sich beide Elektrizitäten ausgeglichen haben. Es findet durch den Draht hindurch oder längs des Drahtes eine Ausgleichung der Elektrizitäten statt, was wir kurz damit bezeichnen, daß wir sagen, die Elektrizität fließe durch den Draht. Wir können uns direkt vorstellen, daß die Elektronen sich in dem Draht bewegen; die positiven nach der einen Richtung zum negativen Leiter hin, die negativen nach der anderen Richtung zum positiven Leiter hin. Durch die Drehung der Maschine wird fortwährend auf dem einen Konduktor positive, auf dem anderen negative Elektrizität erzeugt, der eine Konduktor hat also positive Spannung, der andere negative, es herrscht also zwischen ihnen ein Unterschied der Spannung, eine Spannungsdifferenz, und gerade deshalb strömen die beiden Elektrizitäten fortwährend durch den Draht. Man sagt dann, es fließt ein elektrischer Strom durch den Draht. Dieser elektrische Strom nun bringt in dem Draht und in seiner Umgebung gewisse Wirkungen hervor, von denen wir einige hier zuerst nur kurz angeben wollen.

Zunächst haben wir uns schon früher (S. 15) davon überzeugt, daß der Draht dabei wärmer wird. Aus dieser Tatsache ersehen wir, daß der Draht selbst, der Leiter, bei einem solchen Strom mitbeteiligt ist. Bei dem Gleichgewicht der Elektrizität erkannten wir, daß nur die Oberfläche

der Leiter elektrisch ist; bei einem Strom aber spielt das Innere des Drahtes selbst eine Rolle, wie wir eben daraus erkennen, daß es sich erwärmt, und wie wir noch genauer aus den Gesetzen dieser Erwärmung erkennen werden.

Eine zweite wichtige Wirkung des elektrischen Stromes besteht darin, daß in seiner Nähe Magnetnadeln aus ihrer Richtung abgelenkt werden. Man kann das auf folgende Weise erkennen. Man umhüllt einen Draht sorgfältig mit Kautschuk und windet ihn vielmal um einen Holzrahmen (Fig. 23). Durch ein freigelassenes Loch in diesem Holzrahmen steckt man ein Elfenbeinstäbchen, welches an einem Faden hängt und welches zwei Magnetnadeln s n und n s trägt, so daß die eine Nadel innerhalb der Windungen, die andere oberhalb sich befindet. Die beiden Nadeln haben ihre Pole in entgegengesetzter Lage, so daß dem Nordpol der einen der Südpol der anderen gerade gegenüberliegt. Ein solches System nennt man ein astatisches Nadelpaar. Sowie man nun durch diesen gewundenen Draht, den man Multiplikator nennt, den elektrischen Strom hindurchfließen läßt, indem man etwa die beiden Belegungen einer geladenen Leydener Batterie mit je einem Ende des Drahtes verbindet, werden die Nadeln aus ihrer Lage abgelenkt und bleiben so lange abgelenkt, als der Strom fließt. Hört der elektrische Strom auf, so kommen die Nadeln auch wieder in ihre Ruhelage. Diese magnetische Wirkung des elektrischen Stromes, deren genauere Bestimmung uns noch beschäftigen wird, wird uns oft dazu dienen, anzuzeigen, ob überhaupt ein elektrischer Strom durch einen Draht fließt. Der elektrische Strom hat noch eine Reihe von anderen Wirkungen, die aber mit den schwachen Strömen, mit denen wir es hier zu tun haben, nur schwer nachzuweisen sind.

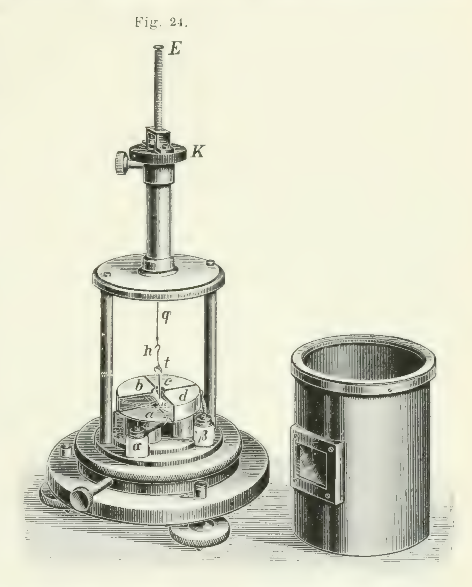
Fig. 23.



Überall in der Wissenschaft beruht der Fortschritt in der Erkenntnis darauf, daß man von den groben, in die Augen fallenden zu den feinen, zunächst unbemerkbaren Erscheinungen übergeht. Und das ist nur möglich, wenn man sich immer empfindlichere Meßapparate verschafft, durch die man auch sehr feine Veränderungen noch exakt messen kann. So ist auch für dieses Gebiet der elektrischen Ladungen und Spannungen der Fortschritt nur durch Apparate möglich geworden, die auch sehr geringe Elektrizitätsmengen und Spannungen sicher zu erkennen und zu messen erlauben. Apparate, welche dieses gestatten, nennt man Elektrometer. Schon ein gewöhnliches Goldblattelektroskop gibt uns ja ein Mittel, um das Vorhandensein von Elektrizität anzuzeigen und in der oben beschriebenen Exnerschen Form auch Messungen an ihr anzustellen. Ebenso erlaubt das Braunsche Elektroskop die Spannung von geladenen Körpern messend zu verfolgen. Diese Elektroskope sind aber zu wenig empfindlich. Ein viel empfindlicheres Elektrometer ist das Quadrantelektrometer, welches schon außerordentlich geringe Spannungen zu messen gestattet. Dasselbe ist ursprünglich von Lord Kelvin konstruiert worden, hat aber allmählich viele Veränderungen erfahren. Das im folgenden beschriebene Instrument (Fig. 24) rührt von Dolezalek her.

Innerhalb eines Kästchens aus Messing, das in 4 Quadranten a b c d geteilt ist (der Quadrant a ist fortgelassen, damit man das Innere sehen kann), schwebt eine Nadel u, welche aus versilbertem Papier besteht, das in Form einer 8 geschnitten ist. An der Nadel ist ein Stift befestigt, welcher aus dem Kästchen herausragt, einen Spiegel t trägt, und oben in einen Haken h ausläuft. Mittels dieses Hakens ist die Nadel an einem dünnen Quarzfaden q aufgehängt, der selbst oben am Kopf K des Apparates befestigt ist. Die Quadranten stehen, um gute Isolation zu erreichen, auf Bernsteinfüßen. Die Quadranten a und c sind unter sich durch einen Draht verbunden und von a führt ein Draht zu der Klemmschraube α, ebenso sind b und d unter sich verbunden und von d führt ein Draht zu der Klemmschraube β. α und β bezeichnet man als die Elektroden des Elektrometers. Der Quarzfaden, der an sich ein Isolator ist, wird dadurch leitend gemacht, daß er und alles, was an ihm befestigt ist, vor dem Gebrauch in eine Lösung von Chlorcalcium getaucht wird. Dieses Salz ist hygroskopisch, zieht immer Wasser aus der Luft an und bleibt daher feucht und leitend. Der ganze Apparat wird, um Luftströmungen zu vermeiden, mit dem daneben abgebildeten Kästchen bedeckt, durch dessen Fenster man den Spiegel beobachten kann.

Fig. 24.



Um den Apparat zu benutzen, wird die Nadel u so gestellt, daß sie zwischen a d und b c liegt; sie wird ein für allemal stark positiv geladen (auf eine hohe positive Spannung gebracht), etwa durch Verbindung der Klemme E mit dem einen Pol der Lichtleitung, wenn eine solche vorhanden ist. Durch den leitenden Quarzfaden wird diese Spannung auf die Nadel übertragen. Nun wird eine der beiden Elektroden, z. B. α, mit der Erde verbunden, also auf die Spannung Null gebracht, und dadurch auch die mit ihm verbundenen Quadranten a und c. Durch die andere Elektrode β wird den Quadranten d und b die zu untersuchende Elektrizität mitgeteilt. Ist diese positiv, so wird die positive Nadel von d und b abgestoßen, bewegt sich also nach a und c hin, dreht sich mithin in derselben Richtung wie ein Uhrzeiger. Ist dagegen

die zugeführte Elektrizität negativ, so wird die Nadel von d und b angezogen, dreht sich also entgegengesetzt wie ein Uhrzeiger. Der Sinn der Drehung gibt also an, ob die zugeführte Elektrizität positiv oder negativ ist, und die Größe der Drehung, die man durch die Verschiebung des Bildes einer Skala im Spiegel messen kann, gibt ein Maß für die Größe der untersuchten Spannung. Das Bild der Skala im Spiegel wird durch ein Fernrohr beobachtet.

Betrachten wir die Wirkung des Quadrantelektrometers genau, so erkennen wir, daß es, wie auch das Exnersche und Braunsche (oben S. 17 f.) Elektroskop, zunächst nicht Elektrizitätsmengen sind, welche man damit messen kann, sondern Spannungen, und daß man erst indirekt daraus auch die Größe von Elektrizitätsmengen miteinander vergleichen kann. Denn bei der Messung wird die Nadel ein für allemal auf einer sehr hohen Spannung gehalten, indem man ihre Elektrode E mit einer Elektrizitätsquelle verbindet, die eine hohe Spannung hat. Der zu untersuchende Körper wird durch einen feinen Draht mit dem einen Quadrantenpaare, etwa mit b und d, verbunden. Von dem zu untersuchenden Körper strömt nun durch den Draht Elektrizität so lange auf das Quadrantenpaar b und d, bis dessen Spannung gleich der des zu untersuchenden Körpers ist. Dieses Quadrantenpaar enthält also um so mehr Elektrizität, je höher die Spannung des zu untersuchenden Körpers ist. Der Drehungswinkel der Nadel gibt also direkt ein Maß für die Spannung des untersuchten Körpers, nicht für die auf ihm befindliche Elektrizitätsmenge, und wir haben dadurch die Möglichkeit, die Spannungen von geladenen Körpern miteinander zu vergleichen. Um die Spannung, die man durch ein Elektrometer mißt, direkt in Volt ausdrücken zu können, muß man das Elektrometer, wie man es nennt, eichen. Das geschieht auf folgende Weise. Man hat Apparate, die sogenannten Normalelemente, deren Spannung in Volt ein für allemal durch genaue Messungen bestimmt ist. Wir werden von diesen Normalelementen im 4. Kapitel ausführlich sprechen. Hier nehmen wir voraus, daß ein Westonelement eine Spannungsdifferenz an seinen Polen hat, die 1,019 Volt beträgt. Verbindet man also den einen Pol eines Westonelementes mit der Erde, den anderen mit dem einen Quadrantenpaar unseres Elektrometers, so erhält dieses die Spannung von 1,019 Volt und die Nadel mit ihrem Spiegel macht dann eine bestimmte Drehung, die man mittels des Fernrohrs durch die Anzahl der vorbeiwandernden Skalenteile der gespiegelten Skala mißt. Es seien das z. B. 100 Skalenteile. Dann entspricht jeder Skalenteil Ausschlag der Nadel einer Spannung von 0,01019 Volt und man kann dann, wenn man für eine zu messende Spannung bloß die Anzahl der Skalenteile, den Ausschlag der Nadel, bestimmt hat, sofort die Spannung in Volt angeben.

Wir können aber durch zweckmäßige Einrichtung von solchen Elektrometermessungen auch die Kapazität eines Leiters oder Kondensators in Mikrofarad messen, wenn wir nur einen Vergleichskondensator von bekannter Kapazität, z. B. unser $^1/_{10}$-Mikrofarad von S. 19 besitzen. Zu dem Zweck laden wir den zu untersuchenden Kondensator z. B. mit einer Elektrisiermaschine. Dann bekommt die Kollektorplatte desselben eine gewisse Spannung und enthält eine gewisse Elektrizitätsmenge, die wir zwar zunächst beide nicht kennen, von denen wir aber aus S. 26 wissen,

daß die Elektrizitätsmenge auf der Kollektorplatte gleich der Kapazität des Kondensators mal seiner Spannung ist. Diese Spannung können wir aber messen, indem wir die Kollektorplatte des Kondensators mit dem Elektrometer verbinden und den Ausschlag der Nadel bestimmen. Wenn das geschehen ist, trennen wir diesen Kondensator wieder von dem Elektrometer und setzen jetzt seine Kollektorplatte mit dem Mikrofarad in Verbindung (dessen Kondensatorplatte, wie immer, zur Erde abgeleitet ist). Dann verteilt sich die Elektrizitätsmenge, die auf dem Kondensator war, jetzt auf die beiden Kollektorplatten. Die Spannung des Kondensators nimmt ab, die des Mikrofarads, die vorher Null war, nimmt zu, bis die beiden Kollektorplatten eine und dieselbe Spannung haben, die natürlich kleiner ist als die vorher auf dem Kondensator vorhandene, während die Elektrizitätsmenge, die auf beiden Platten zusammen vorhanden ist, dieselbe ist wie früher. Die neue Spannung können wir auch wieder mit dem Elektrometer messen, und man sieht nun ein, daß die neue Spannung um so viel kleiner ist, wie die erste, als die Summe der beiden Kapazitäten größer ist, als die Kapazität des ersten Kondensators allein. Dadurch ist das Verhältnis der Kapazität des Kondensators zu der des Mikrofarads bestimmt, also die Kapazität des Kondensators in Mikrofarad ausgedrückt.

Wenn wir von einem geladenen Leiter oder Kondensator die Kapazität in Farad gemessen haben und wenn wir durch das Elektrometer seine Spannung in Volt bestimmt haben, so wissen wir auch, wie groß die Ladung in Coulomb ist, die auf ihm liegt.

Unsere bisherigen Betrachtungen gaben im wesentlichen eine große Reihe von Erfahrungstatsachen; aber diese Erfahrungstatsachen wurden häufig in einer Weise ausgedrückt, welche noch hypothetische Elemente enthielt. So z. B. sprachen wir davon, daß man einen Leiter elektrisch laden kann, wir sprachen davon, daß die Elektrizität sich auf der Oberfläche der Leiter verteilt, und sprachen von der Dichtigkeit der Elektrizität an jedem Punkte des Leiters. In diesen Aussagen sind aber Erfahrungstatsachen mit hypothetischen Auffassungen gemischt. Denn in der Tat beobachten wir nichts weiter, als daß ein „geladener“ Leiter anziehende und abstoßende Kräfte ausübt, und zwar, daß dies alle Stellen des Leiters tun. Aber von der „Elektrizität“, die auf dem Leiter liegen soll, beobachten wir nichts, diese nehmen wir bloß hypothetisch an. In Wirklichkeit versuchen wir aber immer, wenn wir solche Tatsachen beobachten, uns ein Bild davon zu machen, in welcher Weise diese Tatsachen zusammenhängen; wir suchen die beobachtbaren Tatsachen zurückzuführen auf unsichtbare, nur dem geistigen Auge deutliche Vorgänge, welche einfacher sind als diese Tatsachen. So erklärt man sich die elektrischen Erscheinungen, die wir besprochen haben, durch die Annahme, daß es zwei verschiedene Stoffe gibt, die positive und negative Elektrizität, welche sich ebenso als Elementarstoffe verhalten, wie etwa der Wasserstoff und das Silber. Ebenso wie diese in Atome geteilt angenommen werden müssen, ebenso müssen auch die beiden Elektrizitäten, wie eine Reihe von späteren Erfahrungen uns lehren, in Atome eingeteilt angenommen werden, und diese Atome nennt man, wie schon oben angeführt wurde, Elektronen. Um die Eigenschaften der Leiter zu verstehen, müssen wir annehmen, daß

in jedem Leiter die beiden Elektronenarten in praktisch unerschöpflichem Betrage vorhanden sind und in dem Metall, also zwischen den Molekülen des Leiters sich frei bewegen können. Dagegen zeigen die Isolatoren, die Dielektrika, keine freie Beweglichkeit der Elektrizität. Die einfachste Vorstellung über die Natur der Isolatoren ist die, daß jedes kleinste Teilchen eines Dielektrikums, jedes Molekül desselben (welches ja mindestens aus zwei Bestandteilen, Atomen oder Atomkomplexen, zusammengesetzt ist) an dem einen dieser beiden Atome ein positives, an dem anderen ein negatives Elektron enthält. Jedes Molekül ist danach ein polarer Körper, indem es zwei, sich entgegengesetzt verhaltende Ladungen, Pole, besitzt. Der Einfluß des Dielektrikums auf die Influenz, etwa auf die Kapazität eines Kondensators, läßt sich dann so auffassen, daß die positiven Elektronen des Dielektrikums mehr zu der negativen Platte hingezogen werden, die negativen mehr zu der positiven, wodurch die Moleküle alle sich in mehr oder minder parallele Richtungen einstellen, während sie im normalen Zustand, ohne daß Influenz stattfindet, alle wirr durcheinander liegen.

Von diesen Elektronen nun wissen wir nach dem Coulombschen Gesetz, daß sie sich anziehen oder abstoßen. Wenn wir diese Eigenschaft den Elektronen an sich beilegen, so behaupten wir also, daß zwischen ihnen eine Fernkraft vorhanden sei, d. h. eine Kraft, welche von einem Körper A ausgeht und an einem Körper B angreift, ohne daß in dem Zwischenraum zwischen den beiden Körpern etwas von ihr zu merken ist. Der Begriff der Fernkraft enthält aber etwas Unverständliches und Mystisches. Wenn wir beobachten, daß ein Mann an einem Tische sitzt, und daß ein Glas auf diesem Tische sich bewegt, so werden wir naturgemäß zunächst untersuchen, ob nicht eine Verbindung zwischen dem Mann und dem Glas vorhanden ist, etwa durch Fäden oder durch einen Mechanismus in der Tischplatte, oder ob nicht die Bewegung des Glases nur eine scheinbare ist, durch optische Täuschung hervorgerufen. Wenn wir nun auch nichts Derartiges finden können, so werden wir, falls wir nicht etwa zum Spiritismus neigen, unsere Überzeugung doch nicht aufgeben, daß diese Bewegung durch irgend eine reale Vermittelung erzeugt ist und nicht durch Fernkräfte, die etwa von dem Willen des Mannes ausgehen. Nicht anders ist es bei den Kräften, die wir in der Natur sehen, also auch bei den elektrischen Anziehungskräften. Sie erscheinen uns zunächst als Fernkräfte, aber die Annahme derselben kann uns nicht befriedigen, vielmehr werden wir diese Kräfte erst dann verstehen, wenn es gelingt, den Mechanismus klarzulegen, durch welchen ein Körper A auf einen Körper B wirkt. Die Einsicht, daß dies zum vollen Verständnis notwendig ist, hatte zuerst der große englische Physiker Faraday, und seine Bemühungen gingen sein ganzes Leben hindurch darauf hin, durch experimentelle Tatsachen zu zeigen, daß eine solche Vermittelung existiert und worin sie besteht. Da die elektrischen Wirkungen zwar einerseits von der Natur der Isolatoren abhängen, andererseits aber, wie wir später sehen werden, sich durch die Isolatoren mit einer außerordentlich großen Geschwindigkeit fortpflanzen, welche ebenso groß ist wie die Geschwindigkeit des Lichts, so muß man annehmen, daß zwar die körperliche Substanz

der Isolatoren, die Moleküle derselben, die Träger der Elektronen sind, daß aber die Vermittelung, die Übertragung der elektrischen Wirkungen von einem Elektron zu einem anderen durch eine außerordentlich feine elastische Substanz geschieht, dieselbe, welche man auch zur Erklärung der Lichterscheinungen anzunehmen gezwungen ist, und welche man bekanntlich den Lichtäther nennt. Dieser Körper ist im ganzen Weltraum verbreitet, er ist aber auch in den Körpern selbst zwischen den Elektronen vorhanden. Bekanntlich haben die verschiedenen durchsichtigen Körper die Eigenschaft, das Licht mit verschiedener Geschwindigkeit fortzupflanzen und der sogenannte Brechungsindex eines Körpers ist um so größer, je kleiner die Geschwindigkeit des Lichtes in ihm ist. Dieser Äther ist nun nach Maxwell auch der Vermittler, der Überträger der elektrischen Erscheinungen. In einem dielektrischen Körper sind nun nach unserer obigen Annahme die einzelnen Moleküle mit Elektronen verbunden, und bei der Fortpflanzung einer elektrischen Wirkung durch den Äther müssen alle diese Elektronen angegriffen, ihre gegenseitigen Abstände verändert werden. Daraus folgt, daß die Geschwindigkeit, mit der elektrische Wirkungen sich durch einen Isolator fortpflanzen, um so kleiner sein wird, je mehr solche Elektronenpaare in jedem Volumen vorhanden sind, d. h. je größer die Dielektrizitätskonstante des betreffenden Isolators ist, und zwar zeigt eine genauere Betrachtung, daß die Quadratwurzel aus der Dielektrizitätskonstante es ist, welche die Geschwindigkeit der Fortpflanzung elektrischer Wirkungen bedingt. Daraus ist nun zunächst sofort ein wichtiger und interessanter Schluß zu ziehen. Da die Geschwindigkeit des Lichtes um so kleiner ist, je größer der Brechungsindex ist, und die Geschwindigkeit der Elektrizität um so kleiner ist, je größer die Quadratwurzel aus der Dielektrizitätskonstante ist, da aber diese beiden Geschwindigkeiten, wenn sie in demselben Äther verlaufen, dieselben sein müssen, so folgt:

> Die Dielektrizitätskonstante eines Körpers ist gleich dem Quadrat des (optischen) Brechungsindex.

Diese merkwürdige Beziehung, die von Maxwell zuerst ausgesprochen wurde, heißt auch das Maxwellsche Gesetz. Es hat sich dasselbe an der Erfahrung bisher ausgezeichnet bestätigt gezeigt, wenn man nur für den Brechungsindex die richtigen Zahlen nimmt. Folgendes sind z. B. bei einigen Körpern die beobachteten Zahlen für die Dielektrizitätskonstante und für das Quadrat des Brechungsindex:

Name der Substanz	Dielektrizitätskonstante	Quadrat des Brechungsindex
Schwefel	3,97	3,89
Paraffin	2,00	2,01
Schweres Flintglas .	3,16	3,05
Petroleum	2,07	2,07
Terpentinöl	2,23	2,13

Die Kräfte, mit denen zwei elektrische Körper aufeinander nach dem Coulombschen Gesetze wirken, sind also nach dieser Theorie keine Fernkräfte, sondern hervorgebracht durch den Druck oder Zug, den die Elektronen auf den benachbarten Äther ausüben, und der sich durch den Äther fortpflanzt und so Bewegungsantriebe erzeugt. Es lassen sich also die elektrischen Erscheinungen ganz anders auffassen, als der erste Anschein es erfordert und als man es früher getan hat. Diese neuen Anschauungen führen aber, und das hat ihnen die Überlegenheit über die alten gegeben, in ihren Folgerungen zu ganz neuen Erscheinungen, die auch durch die Experimente von Hertz tatsächlich bestätigt worden sind.

---

2. Kapitel.

Kontaktelektrizität. Der elektrische Strom.

Lange Zeit galt es für unmöglich, Elektrizität auf andere Weise zu erzeugen als durch Reibung. Zwar konnte man mit einem einmal elektrisierten Körper auch wieder von neuem durch Influenz Elektrizität entwickeln, aber immer mußte man zuerst einen elektrisierten Körper dazu haben, und dieser ließ sich nicht anders herstellen als durch Reibung. Da war es gegen Ende des 18. Jahrhunderts, daß, durch eine zufällige Entdeckung von Galvani veranlaßt, Volta, Professor der Physik in Pavia, eine Reihe von Experimenten anstellte, welche nicht nur neue Methoden zur Hervorbringung von Elektrizität lehrten, sondern welche die gesamte Kenntnis von den Wirkungen der Elektrizität außerordentlich erweiterten. Volta zeigte zum ersten Male, daß man Körper auch ganz ohne Reibung in den elektrischen Zustand versetzen könnte, er machte zum ersten Male Experimente, in denen Elektrizitätsentwickelung durch chemische Einwirkung zweier leitender Körper aufeinander eintrat.

Der Zufall, durch den diese neue Klasse von Erscheinungen bekannt wurde, war folgender:

Galvani, Professor der Medizin in Bologna, machte im Jahre 1789 (wie eine Erzählung behauptet, war es eigentlich seine Frau) eine Beobachtung, die zunächst ganz rätselhaft erschien. Galvani hatte nämlich einen Froschschenkel an dessen Nervenenden an einem kupfernen Haken aufgehängt und diesen an einem eisernen Balkongitter befestigt. Als zufällig durch den Wind das untere Ende des Froschschenkels mit dem eisernen Geländer selbst in Berührung kam, zuckte der Froschschenkel zusammen und tat dies auch jedesmal, als Galvani nun absichtlich die Berührung mit dem Balkongitter hervorbrachte.

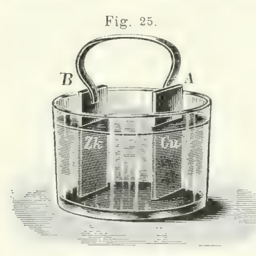
Dieses Experiment machte damals die Runde durch alle wissenschaftlichen Kreise Europas. Aber wie war dieser Versuch Galvanis aufzufassen? Galvani selbst ließ sich durch Voreingenommenheit täuschen, er glaubte, daß dieses Experiment die lange vermutete Lebenskraft beweise, und es gelang ihm nicht, diesen immerhin sehr verwickelten Komplex von Erscheinungen in seine einfacheren Elemente aufzulösen. Erst Volta zeigte durch eine Reihe von Versuchen, daß folgende Dinge bei diesem Versuche wesentlich zum Gelingen sind:

Erstens: Es müssen außer dem Froschschenkel zwei verschiedene Metalle vorhanden sein. Bei Galvani waren es Kupfer und Eisen, es können aber auch Zink und Kupfer, oder Zink und Platin, oder überhaupt irgend zwei verschiedene Metalle sein. Mit zwei gleichen Metallen gelingt der Versuch nicht.

Zweitens: Die drei vorhandenen Körper, der Froschschenkel und die beiden Metalle müssen einen geschlossenen Kreis bilden, es muß das Kupfer einerseits mit dem Eisen, andererseits mit dem Froschschenkel und ebenso das Eisen einerseits mit dem Kupfer, andererseits mit dem Froschschenkel in Berührung sein, sonst gelingt der Versuch nicht.

Drittens aber, welche Rolle spielt der Froschschenkel bei diesem Experiment? Sicher ist, daß in diesem geschlossenen Kreis, gebildet aus zwei Metallen und dem Froschschenkel, etwas Ungewöhnliches vor sich geht, was sich eben durch das Zucken des Froschschenkels manifestiert. Aber hierbei liegen noch zwei Möglichkeiten vor: Entweder nämlich ist der Froschschenkel überhaupt zu dem ungewöhnlichen Vorgang notwendig — und das war die Ansicht von Galvani, welcher ja die Lebenskraft aus diesem Versuche zu ersehen glaubte — oder zweitens, der ungewöhnliche Vorgang an sich ist nicht an die organische Materie des Froschschenkels geknüpft, sondern der Froschschenkel zeigt durch seine Zuckungen nur an, daß eben etwas Merkwürdiges vor sich geht, er ist nur ein Reagenzmittel für den Vorgang, ganz wie das Blauwerden von Stärke ein Reagens auf das Vorhandensein von Jod ist. Diese zweite Ansicht erwies sich als die richtige. Nicht darauf kommt es an, daß gerade ein Froschschenkel mit den beiden Metallen in Berührung ist, sondern darauf, daß eine Flüssigkeit, wie das salzhaltige Wasser, welches in dem Froschschenkel vorhanden ist, mit den beiden verschiedenen Metallen in Berührung ist, und daß diese beiden Metalle sich selbst berühren, daß also ein geschlossener Kreis vorhanden ist, gebildet aus einer Flüssigkeit und zwei verschiedenen Metallen.

Fig. 25.



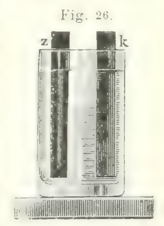
Wenn man also, so schloß Volta weiter, wie in Fig. 25, zwei Metalle, Zink (Zk) und Kupfer (Cu), in eine Flüssigkeit, z. B. verdünnte Schwefelsäure oder auch bloß in gewöhnliches Brunnenwasser stellt und wenn man das Kupfer, wie in der Figur, durch einen geraden oder gebogenen Draht A B mit dem Zink außerhalb der Flüssigkeit verbindet, so geht in diesem geschlossenen Kreis dasselbe Ungewöhnliche vor wie bei dem Galvanischen Experiment. In der Tat ist dies dieselbe Anordnung wie bei Galvani, nur daß statt Kupfer und Eisen hier Kupfer und Zink und daß statt des Froschschenkels direkt eine Flüssigkeit in einem Gefäß angewendet sind.

Was geht nun in einem solchen Kreis vor, was ist es, das die Zuckungen des Froschschenkels veranlaßt? Daß die Elektrizität hierbei in das Spiel kommt, hatte schon Galvani bei seinen ersten Versuchen erkannt, denn er konnte den Froschschenkel auch zum Zucken bringen, wenn er in seiner Nähe nur elektrische Funken durch eine Elektrisiermaschine erzeugte. Volta aber erkannte, daß in diesem geschlossenen Kreis ein Vorgang stattfinde, den wir als elektrischen Strom schon oben (S. 37) bezeichnet haben, daß nämlich durch den Draht A B dauernd sich Elektrizität bewege. Den Beweis dafür können wir dadurch erbringen, daß wir zeigen, daß wir dieselben Wirkungen, die wir oben beim Durchgang der Elektrizität durch

einen Draht vom positiven zum negativen Konduktor einer Elektrisiermaschine beobachtet haben, hier wieder finden. Die erste Wirkung bestand darin, daß der Draht dort erwärmt wurde, was wir durch das Rießsche Luftthermometer nachwiesen. Dieselbe Wirkung finden wir auch hier und zwar in viel stärkerem Maße. Wenn wir den Draht A B nur mit der Hand anfassen, so merken wir sofort, daß er wärmer ist als die Umgebung, und mit einem Thermometer, das wir anlegen, können wir das noch viel genauer kontrollieren. Zweitens wurde damals ein astatisches Nadelpaar, um welches der Draht herumgeführt war, abgelenkt, sobald die Elektrizität sich durch den Draht bewegte. Benutzen wir denselben Multiplikatordraht (S. 38) jetzt dazu, um durch ihn A und B zu verbinden, statt durch den in der Fig. 25 gezeichneten dicken Draht, so finden wir eine noch viel kräftigere und dauernde Ablenkung des astatischen Nadelpaares, ja es würde hier, wie wir bald sehen werden, eine gewöhnliche einfache Magnetnadel zu diesem Versuch vollständig genügen.

Wir können also nicht zweifeln, daß in diesem Apparat, den man ein Voltasches Element nennt, ein elektrischer Strom fließt. Aber, so müssen wir fragen und so hat auch Volta gefragt, woher entsteht denn hierbei die Elektrizität und woher kommt es, daß sie nicht in Ruhe bleibt, wie auf einem geladenen Leiter, sondern daß sie sich bewegt? Vor allen Dingen wissen wir bereits, daß, wenn die Elektrizität sich von einem geladenen Leiter A zu einem anderen geladenen Leiter B bewegt, daß das nur dann geschehen kann, wenn die beiden Leiter verschiedene Spannung, einen Spannungsunterschied besitzen. Wir werden daher von selbst auf die Frage geführt, ob die beiden Metallplatten, die in die Flüssigkeit tauchen, einen solchen Spannungsunterschied wirklich zeigen, wenn sie nicht durch einen Draht verbunden sind, wenn das Element, wie man sagt, offen ist. Der Versuch ist ja leicht gemacht. Wir brauchen bloß unser Quadrantelektrometer anzuwenden. Nehmen wir also (Fig. 26) ein Glas, welches wir mit verdünnter Schwefelsäure füllen, und tauchen wir in dasselbe eine Zinkplatte z und eine Kupferplatte k; verbinden wir nun das herausstehende Ende der Zinkplatte durch einen Draht mit dem einen Quadrantenpaar unseres Quadrantelektrometers (dessen Nadel, wie stets, durch eine geladene Leydener Flasche auf hoher Spannung gehalten ist), so finden wir in der Tat, daß die Nadel einen Ausschlag von, sagen wir, 40 Teilstrichen macht, und zwar können wir uns leicht überzeugen, daß die Drehung der Nadel dabei anzeigt, daß die Zinkplatte negative Spannung hat. Machen wir denselben Versuch, indem wir nun die Kupferplatte mit demselben Quadrantenpaar verbinden, so bekommen wir einen Ausschlag der Nadel von derselben Größe, 40 Skalenteile, aber in entgegengesetzter Richtung, wodurch wir erfahren, daß das Kupfer positive Spannung besitzt.

Fig. 26.



Durch diesen Versuch ist also nachgewiesen, daß unsere beiden verschiedenen Metalle, die in die Flüssigkeit tauchen, tatsächlich einen Spannungsunterschied besitzen, einen Spannungsunterschied, der durch die Zahl 80 (40 positive weniger 40 negative Teilstriche) in unserem

willkürlichen Maß angegeben ist. Wenn wir von vornherein unser Elektrometer geeicht haben (S. 40), so können wir diesen Unterschied der Spannungen auch sofort in unseren Einheiten, in Volt, ausdrücken. Bei der hier angenommenen Größe des Ausschlages würde ein Teilstrich etwa einem achzigstel Volt entsprechen, so daß unsere Messung uns sagt: zwischen dem Kupfer und dem Zink in der Flüssigkeit herrscht ein Unterschied der Spannungen von etwa 1 Volt.

Dieser Unterschied der Spannungen der beiden Metalle, so lehrt nun die Erfahrung weiter, bleibt immer bestehen und ist immer von demselben Betrage, welche Operationen wir auch mit dem Element vornehmen.

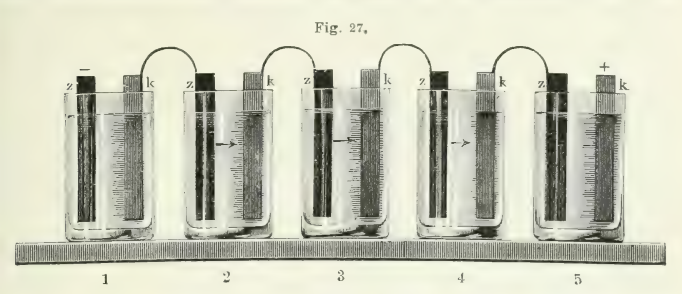
Wenn unser Gefäß isoliert ist, d. h. wenn beide Metalle und die Flüssigkeit ohne leitende Verbindung mit der Erde oder mit anderen Elektrizitätsquellen sind, so beträgt die Spannung auf dem Kupfer + ½ Volt, die auf dem Zink — ½ Volt, so daß ihre Differenz gleich 1 Volt ist. Ist dagegen z. B. das Zink zur Erde abgeleitet, also auf der Spannung Null, so ist die Spannung des Kupfers = 1 Volt. Ist das Kupfer zur Erde abgeleitet, also auf der Spannung Null, so zeigt das Zink die Spannung — 1 Volt. Wird andererseits das Zink z. B. mit dem Konduktor einer Elektrisiermaschine in Verbindung gesetzt, der auf der Spannung 1000 Volt ist, so wird es ebenfalls die Spannung 1000 Volt bekommen, aber die Spannung auf dem Kupfer ist dann 1001 Volt, so daß die Differenz wieder 1 Volt ist. Also ergibt sich, daß die Spannung auf dem Kupfer hierbei unter allen Umständen immer um einen bestimmten Betrag, 1 Volt, größer ist als die auf dem Zink.

Eine Kombination wie die angewendete aus einer oder auch aus mehreren Flüssigkeiten und zwei Metallen nennt man ein *galvanisches Element*, die beiden aus der Flüssigkeit herausragenden Enden der Metalle nennt man die *Pole* des Elements. In jedem offenen galvanischen Element haben also die beiden Metalle einen bestimmten Spannungsunterschied. Dieser hängt nur ab von der *Natur* der beiden Metalle und der Flüssigkeit, aber nicht von der Größe und Form der Metalle oder der Menge der Flüssigkeit. Man kann große Zink- und Kupferplatten in Schwefelsäure tauchen lassen, oder kleine, man erhält immer am Elektrometer denselben Spannungsunterschied. Man bezeichnet diesen bestimmten Spannungsunterschied als die *elektromotorische Kraft des Elements*. Ein jedes galvanische Element hat also eine bestimmte elektromotorische Kraft, die in Volt ausgedrückt wird.

Die Spannungen der beiden Metalle in einem Element sind also um diese bestimmte Größe verschieden, wie groß auch die wirklichen Werte der Spannungen gemacht werden mögen. Daraus folgt zunächst als praktisches Resultat, daß wir durch eine Kombination von mehreren Elementen den Unterschied der Spannungen an den Endgliedern beliebig erhöhen können. Stellen wir nämlich eine Reihe von Elementen her, die je einen Kupferstab und einen Zinkstab in verdünnter Schwefelsäure enthalten, und verbinden wir, wie in Fig. 27, den Kupferstab unseres ersten Glases mit dem Zinkstab des zweiten Elements und so fort, so tritt folgendes ein. Das erste Kupfer hat eine um 1 Volt höhere Spannung wie das erste Zink und dieselbe Spannung bekommen auch alle mit ihm verbundenen Körper. Also hat auch das zweite Zink eine um 1 Volt

höhere Spannung als das erste. Aber das Kupfer des zweiten Systems hat wiederum eine um 1 Volt höhere Spannung als das Zink dieses Systems, folglich hat der Kupferstab des zweiten Systems und ebenso das Zink des dritten Glases eine um 2 Volt höhere Spannung als das Zink des ersten Systems. Verbindet man also in der angegebenen Weise eine beliebige Anzahl, etwa 5 gleiche galvanische Elemente, so wird der Spannungsunterschied der Endglieder fünfmal so groß sein als in jedem einzelnen System. Fünf von unseren Elementen in der angegebenen Weise verbunden, haben also den Spannungsunterschied 5 Volt an ihren Endgliedern. Sind alle Elemente isoliert, so wird also das erste Zink die Spannung — 2,5 Volt

Fig. 27.



haben, das letzte Kupfer die Spannung + 2,5 Volt. Die elektromotorische Kraft dieses Systems ist 5 Volt.

Eine Reihe von galvanischen Elementen, die so verbunden sind, daß immer das positive Metall des einen Elements mit dem negativen des nächsten durch einen Draht in leitendem Kontakt ist, nennt man eine Kette oder Batterie, oder auch besser eine hintereinander verbundene Kette. In einer solchen Kette sind nur die beiden letzten Metalle frei, alle übrigen sind miteinander verbunden. Man nennt auch hier die Enden der beiden freien Metalle die Pole der Kette.

Woher kommt es nun aber, daß in einer solchen Kombination von zwei Metallen und einer Flüssigkeit dauernd ein bestimmter Spannungsunterschied vorhanden ist? Woher kommt die Elektrizität, die diesen Spannungsunterschied hervorbringt? Diese Frage ist zunächst nicht leicht zu beantworten. Volta nahm an, daß die bloße Berührung der Metalle und der Flüssigkeiten die Ursache dieser Elektrizitätserzeugung sei und bezeichnete sie daher als Kontaktelektrizität. Dieser Name ist geblieben, obwohl wir heute wissen, daß es nicht die bloße einflußlose Berührung ist, sondern daß es die chemischen Vorgänge sind, die Auflösung der Metalle in der Flüssigkeit, welche die Elektrizität hierbei auftreten lassen. Indes unabhängig von jeder besonderen Erklärung können wir die neue Tatsache kurz so ausdrücken, daß wir sagen, bei der Berührung eines Metalls und einer leitenden Flüssigkeit entsteht an der Berührungsfläche eine Kraft, welche auf beiden Elektrizität entwickelt und zwar auf dem Metall die entgegengesetzte wie auf der Flüssigkeit. Damit sagen wir noch gar nichts Näheres über die Natur dieser Kraft aus.

Wir nennen diese Kraft die elektrische Scheidungskraft. Die elektrische Scheidungskraft bewirkt also, daß die Spannung des Metalls und der Flüssigkeit voneinander verschieden wird. Das Metall hat in seiner ganzen Ausdehnung eine bestimmte Spannung, die Flüssigkeit hat auch in ihrer ganzen Ausdehnung eine bestimmte Spannung, welche aber von der ersten verschieden ist. Und die Erfahrung hat nun gezeigt, daß die elektrische Scheidungskraft immer so viel Elektrizität entwickelt, daß die beiden Substanzen stets denselben Spannungsunterschied (stets dieselbe Potentialdifferenz) zeigen, welche Größe und Gestalt sie auch haben mögen, und unabhängig davon, ob etwa sonst noch auf ihnen Elektrizität vorhanden ist.

Über die Größe dieses Spannungsunterschiedes zwischen einem Metall und einer Flüssigkeit hat man lange wegen der experimentellen Schwierigkeiten keine genügenden Zahlenwerte aus der Erfahrung gewinnen können. Erst zirka 100 Jahre nach Voltas Entdeckung ist man dazu gekommen, auf sichere Weise sich Kenntnisse von der Größe des erzeugten Spannungsunterschiedes zu verschaffen, der zugleich ein Maß für die Größe der entsprechenden Scheidungskraft ist.

Man bezeichnet die Scheidungskraft zwischen zwei Körpern gewöhnlich dadurch, daß man sie nebeneinander schreibt und zwischen ihnen einen vertikalen Strich macht. Es bedeutet also:

Zink | Schwefelsäure

die Scheidungskraft zwischen Zink und Schwefelsäure.

Ist die betreffende Scheidungskraft positiv, so heißt das, der vorangehende Körper bekommt höhere Spannung als der nachfolgende; ist sie negativ, so hat der vorausgehende die geringere Spannung.

Die Scheidungskraft

Schwefelsäure | Zink

hat demnach den entgegengesetzten Wert, weil die Ordnung der Körper dabei vertauscht ist.

So wurden folgende Werte für die Spannungsunterschiede, also auch für die Scheidungskräfte zwischen den folgenden Metallen und den angegebenen Flüssigkeiten gefunden. Diese Spannungsunterschiede sind schon in Volt ausgedrückt und sie sind als direkte Messungsresultate anzusehen:

Magnesium	Magnesiumsulfat	= — 1,239	Volt
Aluminium	Aluminiumsulfat	= — 1,040	„
Zink	Zinksulfat	= — 0,524	„
Kadmium	Kadmiumsulfat	= — 0,162	„
Eisen	Eisensulfat	= + 0,093	„
Kupfer	Kupfersulfat	= + 0,515	„
Quecksilber	Quecksilbersulfat	= + 0,980	„
Silber	Silbersulfat	= + 0,974	„

Diese Zahlen besagen also, daß an der Grenzfläche von Zink und Zinksulfat immer ein Spannungsunterschied von 0,524 Volt entsteht und zwar, daß das Zink dabei die niedrigere, die Flüssigkeit die höhere

Spannung besitzt. Umgekehrt hat das Kupfer in Berührung mit Kupfersulfat die höhere Spannung und zwar eine um 0,515 Volt höhere als die Flüssigkeit. Taucht eines dieser Metalle nicht in die entsprechende Sulfatlösung, sondern in Schwefelsäure, so bildet sich rein chemisch gleich in der Nähe das entsprechende Sulfat und die obigen Zahlen gelten also auch für den Fall, daß die betreffenden Metalle in Schwefelsäure gestellt werden.

Auch wenn zwei Metalle sich berühren, scheint ein solcher Spannungsunterschied zwischen ihnen zu entstehen. Doch ist dieser außerordentlich viel geringer als bei der Berührung eines Metalls und einer leitenden Flüssigkeit. Ebenso entsteht auch ein kleiner Spannungsunterschied, wenn zwei verschiedene leitende Flüssigkeiten sich berühren. Doch sind in diesen Fällen, wie man allmählich eingesehen hat, die auftretenden Scheidungskräfte so gering, daß wir uns mit ihnen im folgenden nicht beschäftigen wollen, sondern nur die bedeutenden Spannungsunterschiede zwischen den Metallen und den sie berührenden Flüssigkeiten weiter untersuchen wollen. Metalle und Flüssigkeiten, die beide die Elektrizität leiten, unterscheiden sich also dadurch voneinander, daß bei ihrer Berührung ein starker Spannungsunterschied entsteht, während ein solcher bei der Berührung von Metallen unter sich oder Flüssigkeiten unter sich kaum auftritt.

Man teilt deshalb die leitenden Körper in zwei Klassen ein: in Leiter erster Klasse und Leiter zweiter Klasse.

Die Leiter erster Klasse sind alle Metalle, ferner einige Metallsuperoxyde, z. B. Braunstein, Bleisuperoxyd, ferner einige Schwefelverbindungen, wie Bleiglanz, Schwefelkies u. s. w.

Die Leiter zweiter Klasse sind diejenigen, welche mit den Leitern erster Klasse zusammen große Spannungsunterschiede ergeben. Zu ihnen gehören die Lösungen von Säuren in Wasser, die Lösungen von Salzen in Wasser und geschmolzene Salze.

Der Spannungsunterschied, der zwischen Leitern erster und zweiter Klasse stets auftritt, hat nun sehr wesentliche Folgen.

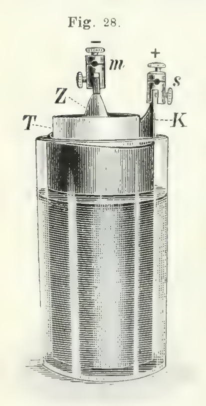
Bringen wir nämlich nun eine Zinkplatte und eine Kupferplatte frei, d. h. nicht durch einen Draht verbunden, in verdünnte Schwefelsäure, so tritt folgendes ein. Die Zinkplatte wird durch die elektrische Scheidungskraft negativ elektrisch, bekommt also eine negative Spannung, die verdünnte Schwefelsäure bekommt eine positive Spannung und die Scheidungskraft sucht diese Verteilung immer beständig zu erhalten. In Zahlen ausgedrückt beträgt der Überschuß der Spannung der verdünnten Schwefelsäure über die des Zinks 0,524 Volt. In der verdünnten Schwefelsäure steht nun aber noch die Kupferplatte. Diese bekommt durch die Berührung mit der verdünnten Schwefelsäure ebenfalls Elektrizität, also ebenfalls einen Spannungsunterschied gegen diese und zwar wird ihre Spannung höher als die des Kupfersulfats um 0,515 Volt. Daraus folgt, daß das Kupfer so viel positive Elektrizität enthält, daß seine Spannung um 0,515 Volt höher ist als die der Säure und daß diese wieder eine um 0,524 Volt höhere Spannung hat als das Zink, so daß der Überschuß der Spannung des Kupfers über die des Zinks die Summe ist, nämlich 0,515 + 0,524 = 1,039 Volt. Dieser Unterschied ist also dasjenige, was wir die Spannungsdifferenz oder die elektro-

motorische Kraft des Voltaschen Elementes genannt haben. Wir sehen in der Tat, daß diese, wie oben angeführt, ungefähr gleich 1 Volt ist. Wir haben hierbei zwei Metalle kombiniert, welche sich gegen die Flüssigkeit verschieden verhalten. Dasselbe gilt nun auch, wenn wir etwa Zink und Kadmium in Schwefelsäure stellen würden. Die Schwefelsäure hat dabei eine um 0,524 Volt höhere Spannung als das Zink und eine um 0,162 Volt höhere Spannung als das Kadmium, also hat das Kadmium dabei eine um 0,524 weniger 0,162, d. i. um 0,362 Volt höhere Spannung als das Zink. Kadmium wird also dabei positiv elektrisch, Zink negativ, wenn das ganze Element isoliert ist. Wir können diese Resultate verallgemeinernd so aussprechen: Bringt man zwei Metalle zusammen in eine Flüssigkeit, so wird das eine Metall negativ elektrisch, das andere positiv elektrisch, und zwar bleibt immer dasjenige Metall, das durch seine eigene Scheidungskraft stärker negativ elektrisch wurde, auch in diesem Falle negativ.

Bringt man also Zink mit irgend einem anderen in der Tabelle S. 50 auf dasselbe folgenden Metall zugleich in verdünnte Schwefelsäure, so wird immer das Zink negativ elektrisch. Nur mit Magnesium und Aluminium kombiniert würde Zink positiv werden.

Da jedes Metall in Berührung mit einer Flüssigkeit elektrisch wird, so kann man auch Kombinationen derart bilden, daß nicht die beiden Metalle in einer einzigen Flüssigkeit stehen, wie wir es bis jetzt angenommen haben, sondern daß jedes Metall in eine besondere Flüssigkeit taucht, aber die Flüssigkeiten doch in leitender Verbindung sind. Auch hierbei wird das eine Metall positiv elektrisch, das andere negativ, und auch ein solches galvanisches Element hat eine ganz bestimmte elektromotorische Kraft, welche nur abhängt von der Natur seiner Metalle und seiner Flüssigkeiten. Solche Elemente, mit zwei Metallen und zwei Flüssigkeiten, werden aus später sich ergebenden Gründen besonders häufig benutzt, und wir werden deshalb einige von ihnen beschreiben. Damit die beiden Flüssigkeiten sich nicht mischen und doch in leitender Verbindung sind, wird hierbei die eine gewöhnlich in einen porösen Tonzylinder gefüllt, durch dessen Poren die Berührung zwischen den Flüssigkeiten stattfindet.

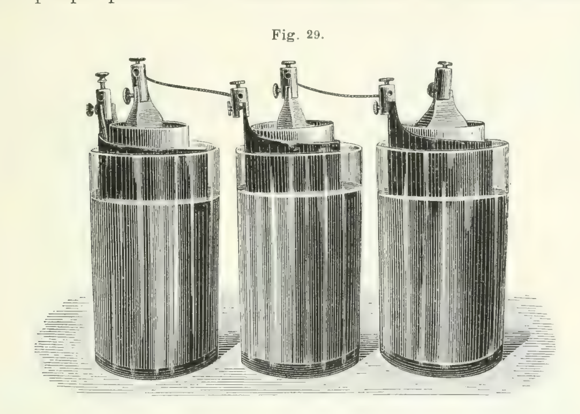
Fig. 28.



Beim Daniellschen Element (Fig. 28) sind die beiden Metalle Zink Z und Kupfer K. Das Kupfer taucht in konzentrierte Kupfervitriollösung, das Zink in verdünnte Schwefelsäure oder auch in verdünnte Zinkvitriollösung. In ein Glas wird Kupfervitriollösung gegossen und der hohle Kupferzylinder K hineingestellt. In diesen wird dann der Tonzylinder T gesetzt und dieser wird mit verdünnter Schwefelsäure (1 Schwefelsäure auf 10 Wasser) gefüllt, in welche dann das massive Zinkstück Z eingesetzt wird. Das Zink trägt an seinem oberen Ende

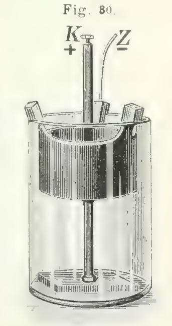
eine Klemmschraube m, der Kupferzylinder eine Klemmschraube s, in welche man Drähte festklemmen kann, um leitende Verbindungen herzustellen. Auf dem Zinkpol wird negative Spannung herrschen, auf dem Kupferpol positive. Die elektromotorische Kraft eines Daniellschen

Fig. 29.



Elementes ist ungefähr gleich 1 Volt (genauer 1,08 bis 1,12 Volt). Will man mehrere Elemente in der vorhin beschriebenen Weise zu einer Kette verbinden, so kann man das leicht, indem man die Klemmschraube s des einen Elements mit der Schraube m des anderen Elements durch einen Draht verbindet. Die Fig. 29 zeigt eine solche Kette aus drei Elementen.

Fig. 30.



Auch bei dem sogenannten Kupferelement der deutschen Telegraphie, auch Krügerelement genannt, werden Kupfer und Zink als Metalle benutzt und als Flüssigkeiten konzentrierte Kupfervitriollösung und verdünnte Zinksulfatlösung, aber durch die Form des Elementes ist dabei die Anwendung einer Tonzelle vermieden. In einem Glase liegt (Fig. 30) auf dem Boden eine Bleiplatte, an der ein Stiel mit Klemme K befestigt ist. Das Zink ist in Form eines starken gegossenen Zylinders benutzt, der mit drei Nasen auf dem Rand des Glases ruht. In eine der Nasen ist der Poldraht Z eingegossen. Der innere Rand des Glases ist oben mit Paraffin angestrichen. Die Bleiplatte umkleidet sich beim Gebrauch der Elemente mit Kupfer und wirkt dann wie eine Kupferplatte. In das Glas wird die Zinksulfatlösung gegossen und die Lösung von Kupfervitriol wird am Boden des Gefäßes dadurch erzeugt, daß man Kupfervitriolkristalle in die Flüssigkeit hineinbringt. Da die Lösung des Kupfersalzes schwerer ist als die verdünnte Zinksalzlösung, so bleibt, wenn das Element ruhig steht, eine ziemlich scharfe Trennung der blauen Kupfersalzlösung von der hellen Zinksalz-

lösung lange bestehen. Die elektromotorische Kraft des Kupferelements ist auch 1,08 bis 1,12 Volt.

Ein Element, das eine größere elektromotorische Kraft hat, ist das

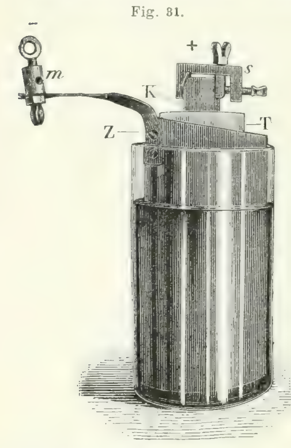


Fig. 31.

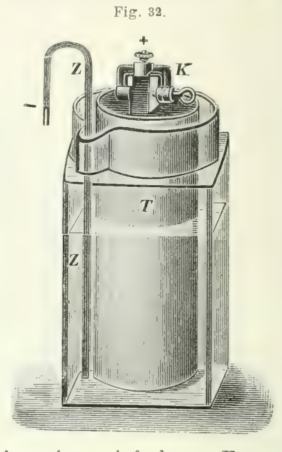
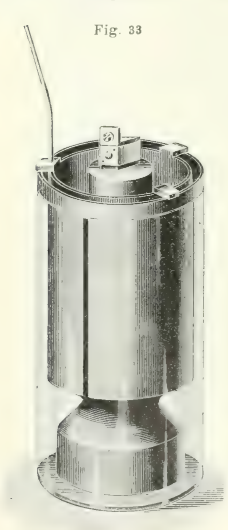


Fig. 32.

Bunsensche Element. Es ist in seiner einfachsten Form in Fig. 31 abgebildet. Das eine Metall ist auch hier wieder Zink, das andere Metall ist durch Kohle ersetzt, welche sich ebenso wie ein Metall verhält. Das Zink taucht wieder in verdünnte Schwefelsäure, die Kohle aber in konzentrierte Salpetersäure. In das Glas wird zuerst Schwefelsäure gegossen, dann der hohle Zinkzylinder Z eingesetzt, in diesen der Tonzylinder T, mit Salpetersäure gefüllt, und darein die Kohle K gestellt. Wieder wird der Zinkpol negativ elektrisch, der Kohlepol positiv elektrisch. An dem Zinkzylinder befindet sich eine Klemmschraube m, an die Kohle wird eine Messingklammer s angeschraubt. Die elektromotorische Kraft eines Bunsenelements ist 1,9 Volt.


Fig. 33

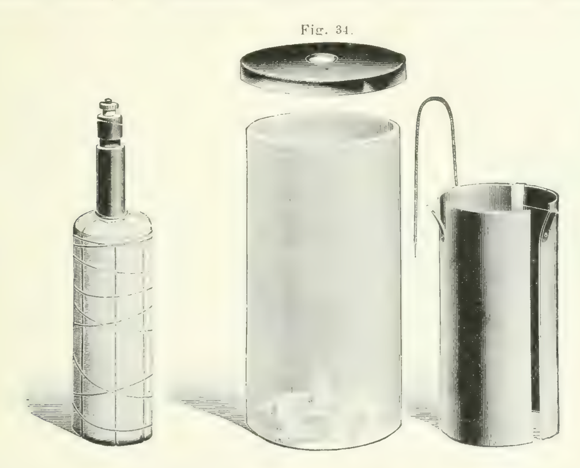
Als weiteres galvanisches Element führen wir, weil es in der Telephonie und bei elektrischen Klingeleinrichtungen sehr viel angewendet wird, das Leclanché-Element an, von dem Fig. 32 eine Ansicht gibt. Auch in diesem sind, wie bei dem Bunsenschen Element, die beiden Metalle Kohle und Zink. Aber die Kohle K, welche positiv elektrisch wird, steht in einer Tonzelle T, die mit einem Gemisch von Braunstein und Kohle gefüllt ist. Die

Zinkstange Z steht in verdünnter Salmiaklösung (20—25 g Salmiak auf so viel Wasser, als in das Glas hineingeht). Es ist also bei diesem Element nur eine Flüssigkeit vorhanden. Die elektromotorische Kraft des Leclanché-Elements ist ungefähr 1,49 Volt.

In der Reichstelegraphie wird dieses Element in der Form der Fig. 33 benutzt und heißt dort Kohleelement. Der Zinkzylinder sitzt wie bei dem Kupferelement (Fig. 30) mit 4 Nasen auf dem Rand des Glasgefäßes auf. In das Glas wird der Kohle-Braunsteinzylinder von der in der Figur sichtbaren Form gestellt und das Gefäß bis 1 ½ cm unter dem Rand mit Wasser gefüllt, dem 20—25 g Salmiak zugesetzt sind.

Zu demselben Typus gehören die S. & H.-Beutelelemente von Siemens & Halske, die insbesondere für starke Stromentnahme für kürzere

Fig. 34.



Zeit brauchbar sind, und deren einzelne Teile in Fig. 34 gezeichnet sind. In das Standglas, dessen Boden passende Erhöhungen besitzt, wird der rechts sichtbare Zinkzylinder unverrückbar eingesetzt. In die Mitte kommt die Kohle, die mit einer aus Kohle und Braunstein bestehenden Masse umgeben und mit einem Beutel umwickelt ist. Auch sie ist am Boden und Deckel unverrückbar befestigt. Das Gefäß wird mit Salmiaklösung gefüllt. Die elektromotorische Kraft des Elementes ist 1,5 Volt. Man hat noch eine ganze Anzahl von anderen Elementen aus zwei Metallen und ein oder zwei Flüssigkeiten konstruiert. Die genannten sind aber die am meisten benutzten.

Sehr bequem werden galvanische Elemente in der Form der Trockenelemente. Sie lassen sich nämlich leicht transportieren und sind immer zum Gebrauch fertig, brauchen also nicht immer besonders zusammengestellt zu werden. Es wird das dadurch erreicht, daß sie nicht direkt Flüssigkeiten enthalten, sondern mit einer Masse gefüllt sind, welche mit der Flüssigkeit imprägniert ist und immer feucht bleibt. Als Metalle sind

bei ihnen auch gewöhnlich Zink und Kohle verwendet. Die Füllmasse dagegen wird meistens als Geheimnis betrachtet. Ein sehr brauchbares Element dieser Art ist das T-Element (Fig. 35), welches die Form eines Kästchens hat und von Siemens & Halske in verschiedenen Größen konstruiert wird. Die Kohle, deren Pol in der Mitte aus dem Kästchen herausragt, ist mit Braunstein umgeben, der durch eine Pergamentpapierhülse gehalten wird. Das Zink, dessen Pol außen durch den gebogenen Enddraht bezeichnet wird, umgibt in Form eines durchlöcherten Zylinders die Pergamenthülse und befindet sich selbst in der mit Salmiak imprägnierten Masse. Die elektromotorische Kraft eines solchen Elementes ist 1,5 Volt. Solche Trockenelemente werden von vielen Fabriken hergestellt.

Die elektromotorische Kraft aller der beschriebenen Elemente und aller anderen beträgt zwischen 1 und 2 Volt. Mit einem gewöhnlichen Elektroskop, etwa einem Goldblattelektroskop, das erst auf Spannungen von 200 Volt und darüber reagiert, sind daher die Spannungen der Pole nicht zu messen, sondern man muß eben ein empfindliches Elektrometer, wie das Quadrantelektrometer, für diesen Zweck benutzen. Indem man aber mehrere hundert solche Elemente hintereinander schaltet, kann man auch an einem Goldblattelektroskop leicht die vorhandene Spannung erkennen. Wenn man aber nur solch höhere Spannungen erzeugen will, ohne zugleich, was die Hauptanwendung der Elemente bildet, stärkere Ströme zu entnehmen, so kann man eine solche Batterie in sehr viel einfacherer Form anwenden, nämlich in der Form der sogenannten Trockensäule, wie sie schon bald nach Voltas Forschungen von Zamboni konstruiert wurde und wie sie jetzt noch für manche Zwecke benutzt wird und von uns auch später benutzt werden wird. Die Trockensäulen, von denen Fig. 36 eine neuere Form zeigt, bestehen aus einer großen Menge von aufeinandergeschichteten Scheiben aus unechtem Gold- und Silberpapier. Eine eigentliche Flüssigkeit ist nicht vorhanden, sondern die Feuchtigkeit, die von selbst in dem Papier immer vorhanden ist und jahrelang bleibt, ersetzt die Flüssigkeit. Die Gold- und Silberseiten der Papiere werden gegeneinandergelegt und bilden so die Verbindung zweier Elemente, deren jedes aus Gold (positiv), feuchtem Papier und Silber (negativ) besteht. Trocken sind also die Säulen nicht; wenn sie ganz trocken wären, so würden sie keine Spannung geben. Indem man etwa 1000 solcher Elemente übereinanderlegt, kann man eine Spannung von etwa 500 Volt erzeugen.

Fig. 35.

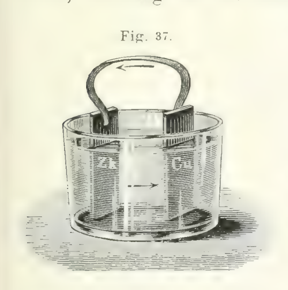


Betrachten wir nun die Vorgänge in einem beliebigen galvanischen Element, z. B. in einem Daniellschen. Auf dem Kupferpol ist positive Elektrizität und positive Spannung, auf dem Zinkpol negative Elektrizität

und negative Spannung vorhanden. Diese beiden Pole verhalten sich also ganz so wie die beiden Konduktoren der Elektrisiermaschine, die wir früher betrachtet haben. Verbinden wir die beiden Pole durch einen Draht, *schließen wir*, wie man sagt, das *Element*, so fließt die Elektrizität von dem einen Pol zum anderen über. Die Elektrizitäten würden sich sofort ausgleichen und das Element würde unelektrisch werden, wenn nicht sofort durch die elektrische Scheidungskraft wieder neue Elektrizitätsmengen erzeugt würden, die sich wieder ausgleichen u. s. f. Es entsteht daher ein *dauernder elektrischer Strom* (*galvanischer Strom*). Die positive Elektrizität fließt von der höheren Spannung längs des Verbindungsdrahts der beiden Pole zur niederen Spannung. Bei dem Daniellschen Element also, bei dem auf dem Kupferpol positive Spannung herrscht, strömt die positive Elektrizität vom Kupferpol längs des Verbindungsdrahts zum Zinkpol. Die Flüssigkeit aber an dem Zink hat wegen der Scheidungskraft höhere Spannung als die in der Nähe des Kupfers und es bewegt sich daher die positive Elektrizität von der Schwefelsäure in der Nähe des Zinks durch die mit Flüssigkeit erfüllten Poren der Tonzelle hindurch zum Kupfervitriol. Das mit diesem in Berührung stehende Kupfer hat wegen der Scheidungskraft wieder höhere Spannung als die Flüssigkeit und so bewegt sich die Elektrizität wieder vom Kupfer weiter. An den Metallen selbst findet also immer ein Sprung der Spannung statt. Dauernd aufrecht erhalten wird der Strom durch die elektrische Scheidungskraft, welche für jede ausgeglichene Elektrizitätsmenge gleich wieder neue erzeugt. Wir könnten ebensogut auch sagen, die negative Elektrizität fließt von dem Zink durch den Verbindungsdraht zum Kupfer, dann aus dem Kupfer durch die Flüssigkeiten zurück zum Zinkpol. Das ist rein Sache der Festsetzung. Man bezeichnet allgemein die Richtung, in der die *positive* Elektrizität fortgeführt wird, kurzweg als die Richtung des *Stromes*. Die Richtung des Stromes in einem Element ist in Fig. 37 dargestellt. Durch den Verbindungsdraht fließt der positive Strom vom Kupfer zum Zink und durch die Flüssigkeit vom Zink zum Kupfer zurück.

Fig. 36.

Fig. 37.



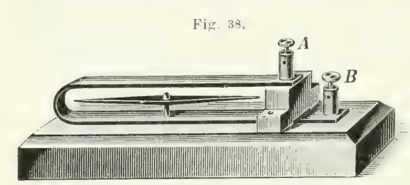
Auf diese Weise ist also das Vorhandensein eines elektrischen Stromes in einem geschlossenen Element erklärt. Daß ein solcher Strom tatsächlich fließt, davon haben wir uns schon oben auf zweifache Weise überzeugt. Zunächst hatten wir gefunden, daß der Draht, durch welchen der Strom fließt, erwärmt wird. Diese Erwärmung kann hierbei aus später einleuchtenden Gründen eine sehr starke werden. Wenn man z. B. die in Fig. 27 gezeichnete Kette durch einen dünnen Draht verbindet, so kommt dieser Draht ins Glühen und schmilzt sogar weg.

Die zweite Wirkung, durch die wir erkannten, daß ein Strom in dem Draht fließt, war die Ablenkung einer Magnetnadel, um die der Strom

herumgeführt wurde. Die Ströme, die wir jetzt haben, zeigen diese Wirkung in viel höherem Grade als der Strom, den wir etwa zwischen den beiden Konduktoren einer Elektrisiermaschine erhielten. Wir bedienen uns, um vorläufig nur qualitativ diese Ablenkung zu zeigen, zunächst des Apparates Fig. 38, den man ein Galvanoskop nennt.

Eine Magnetnadel befindet sich drehbar auf einer Spitze im Inneren eines umgebogenen kupfernen Streifens, der auf Holz montiert ist. An die beiden freien Enden dieses Streifens sind Klemmschrauben A und B aufgeschraubt. Sobald man nun den positiven Pol eines Elementes durch einen Draht mit A und den negativen Pol durch einen Draht mit B verbindet, so ist das Element durch diese Drähte und den Kupferstreifen geschlossen, und man sieht nun sofort die Magnetnadel sich aus der Schleife herausdrehen und nach einigen Schwingungen, die sie ausführt, in der herausgedrehten Lage zur Ruhe kommen. Damit die Magnetnadel vor der Schließung des Elementes in der Kupferschleife steht, wie es die Figur zeigt, ist natürlich notwendig, daß man die Schleife selbst, also den Apparat Fig. 38, in die Süd-Nordrichtung stellt.

Fig. 38.



Bei dieser Verbindung der Pole des Elementes mit A und B wird der Nordpol der Magnetnadel nach vorn aus der Kupferschleife herausgedreht.

Hätten wir den Kupferpol mit B, den Zinkpol mit A verbunden, so wäre der positive Strom in entgegengesetzter Richtung durch die Kupferschleife geflossen, und die Nadel wäre dann auch nach entgegengesetzter Richtung abgelenkt worden.

Während wir beim Gleichgewicht der Elektrizität gesehen haben, daß die Leiter, die Metalle, im Innern ganz frei von Elektrizität sind, daß in ihnen überhaupt keine elektrischen Kräfte wirken, und daß daher die ganze Ladung eines Leiters darin besteht, daß an seiner Oberfläche sich die Elektronen sammeln, ist jetzt bei den galvanischen Strömen die Sachlage nicht mehr so einfach. Eine ganze Reihe von Tatsachen, z. B. schon die Erwärmung der Drähte durch den Strom, zeigen, daß bei der Strömung der Elektrizität das Innere des Leiters selbst beteiligt ist. Wir müssen annehmen, daß die Elektronen sich im Innern der Drähte fortbewegen. Dabei brauchen wir uns aber nicht etwa vorzustellen, daß jedes Elektron, wenn es von dem positiven Pol in den Draht eingetreten ist, sich nun bis zum negativen Pol hinbewegt. Vielmehr, da in dem Drahte selbst von vornherein außerordentlich viele Elektronen als vorhanden angenommen werden müssen, ist die einfachere und mit den Tatsachen besser übereinstimmende Vorstellung die, daß ein an dem positiven Pol eintretendes Elektron das unmittelbar benachbarte durch Stoß in demselben Sinne in Bewegung setzt, dieses wieder ein benachbartes und so von Schicht zu Schicht fortschreitend alle Elektronen des Drahtes eine gewisse Tendenz zur Bewegung in der Richtung nach dem negativen Pole bekommen, obwohl alle sich von ihrem ursprünglichen Platz nur wenig

weiter bewegen. In der Tat können sich ja, wegen der Anwesenheit der metallischen Moleküle, die Elektronen, wenn sie auch sehr kleine Körper sind, nicht ungehindert bewegen, sondern sie müssen fortwährend Hindernisse ihrer Bewegung erfahren, Hindernisse, aus denen sich auch das Auftreten der Wärme in dem Draht erklärt.

Aber, wenn auch die Bewegung der Elektronen i n dem Draht stattfindet, so haben diese Bewegungen doch auch eine Wirkung außerhalb des Drahtes, wie wir schon an der Ablenkung der Magnetnadel erkennen. Die Vorgänge in den Leitern, wie in den angrenzenden Isolatoren, die zusammengehören, machen erst den elektrischen Strom aus.

Diese Fragen wollen wir aber erst näher untersuchen, wenn wir die quantitativen Verhältnisse der elektrischen Ströme näher kennen gelernt haben.

---

3. Kapitel.

Die Gesetze des elektrischen Stromes.

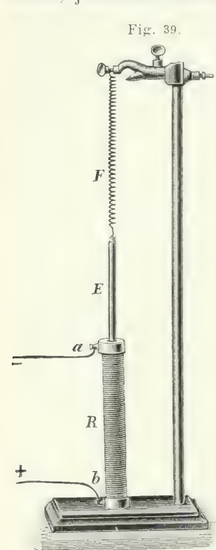
Ein jedes galvanische Element ist imstande, dauernd einen elektrischen Strom zu erzeugen. In der Tat ist ja die Elektrizität auf einem Leiter nur dann im Gleichgewicht, wenn auf ihm überall dieselbe Spannung vorhanden ist. Wenn aber aus irgend einem Grunde an verschiedenen Stellen des Leiters die Spannung verschieden ist, dann muß eben die positive Elektrizität stets von Stellen höherer zu Stellen niederer Spannung auf dem Leiter fließen. In jedem offenen galvanischen Element, dessen Pole also nicht verbunden sind, hat nun jede der beiden Metallplatten mit ihrem Pol eine bestimmte Spannung, aber die des einen Pols ist um eine bestimmte Größe höher als die des anderen. Sobald man daher die beiden Metalle durch einen Draht verbindet, so muß in diesem die positive Elektrizität von dem einen Metall (dem Kupfer im Daniellschen Element) zum anderen (dem Zink) fließen. Aber auch in den Flüssigkeiten des Elements selbst muß die Elektrizität fließen. Denn an jedem der beiden Metalle herrscht ja die elektrische Scheidungskraft und sie bewirkt, daß die Flüssigkeit in der Nähe des einen Metalls (des Zinks) eine höhere Spannung hat wie in der Nähe des anderen (des Kupfers). Sowie also die beiden Metalle durch einen Draht verbunden werden, fließt die Elektrizität durch den Draht und durch das Element selbst hindurch, und die elektrische Scheidungskraft bewirkt, daß dieser Strom ein dauernder ist. Wir können uns dieses Verhalten durch einen Vergleich mit dem Strömen von Wasser leicht klarmachen. In einem Teich stehen zwei Röhren, in welche durch eine Pumpmaschine Wasser hineingepumpt ist, und zwar so, daß das Niveau des Wassers in der einen Röhre höher ist, als in der anderen. Sowie man die beiden Röhren durch eine zwischen ihnen angelegte Röhre verbindet, fließt das Wasser aus der Röhre mit höherem Niveau in die andere. Und wenn man durch die Pumpmaschine dafür sorgt, daß das Niveau der beiden Röhren stets in gleicher Höhe gehalten wird, so fließt das Wasser fortwährend von der ersten Röhre durch das Verbindungsrohr zur zweiten und wird durch die Pumpe wieder auf das erste Niveau gehoben. Ganz entsprechend ist es bei der Elektrizität. Dem Niveau beim Wasser entspricht die Spannung der Elektrizität, die Funktionen der Pumpmaschine übernimmt die elektrische Scheidungskraft. Von der höheren Spannung auf dem Kupfer fließt die positive Elektrizität durch den Verbindungsdraht zum Zink und durch die Flüssigkeit zum Kupfer zurück. Die elektrische Scheidungskraft bringt sie wieder auf die ursprüngliche Spannung, die des Kupfers. *Ein elektrischer Strom fließt also dauernd nur in einem geschlossenen Kreise*, d. h. in einem Kreise, der gebildet ist aus einem Element, dessen Pole durch Leiter miteinander verbunden sind.

Man nennt eine solche geschlossene Leitung, die aus einem Element (oder einer Kette) und einem Verbindungsdraht besteht, einen Stromkreis oder besser einen einfachen Stromkreis (im Gegensatz zu verzweigten Stromkreisen, von denen später die Rede sein wird). Den Verbindungsdraht selbst nennt man den äußeren Stromkreis, die Kette den inneren. Wenn der Strom fließt, so geht durch jeden Teil des gesamten geschlossenen Kreises in jedem Augenblick eine gewisse Menge von Elektrizität, eine gewisse Anzahl von Coulomb, hindurch. Es kann der Stromkreis an verschiedenen Stellen verschieden große Querschnitte haben, stets muß doch bei einem konstanten Strome durch jeden Querschnitt in einer Sekunde gleichviel Elektrizität hindurchfließen. Denn wenn an einen Querschnitt mehr Elektrizität hinströmen als von ihm fortströmen würde, so würde ja an dieser Stelle eine immer weiter gehende Anhäufung der Elektrizität stattfinden. Man nennt die Elektrizitätsmenge, also die Anzahl Coulomb, die in einer Sekunde durch irgend einen Querschnitt des Stromkreises hindurchfließt, die Stromstärke oder Stromintensität. Wieviel Elektrizität durch einen Querschnitt in einer Sekunde hindurchfließt, das hängt natürlich von verschiedenen Umständen ab. Das hängt einmal davon ab, wie groß die treibende Kraft ist, welche den galvanischen Strom hervorruft, wie groß also die elektromotorische Kraft des Elementes (S. 48) ist. Zweitens hängt es aber auch davon ab, durch welche Stoffe der Strom fließt und wie gestaltet diese sind. Aber mögen sie auch Formen haben, welche sie wollen, in einem bestimmten Stromkreis fließt durch jeden Querschnitt, wie groß oder wie klein er sein mag, immer ein und dieselbe Menge Elektrizität in der Sekunde. Mit anderen Worten heißt dies, die Stromstärke ist in einem Stromkreis überall dieselbe. In jedem einfachen Stromkreis hat also der elektrische Strom eine gewisse Stärke und zwar an allen Stellen des Stromkreises dieselbe. Man kann sich dies wieder an dem Vergleich mit unseren Röhren, in welchen ein Strom von Wasser fließt, klarmachen. Wenn die eine Röhre an verschiedenen Stellen etwa verschiedene Weite besitzt, und durch die Pumpmaschine in diese Röhre in jeder Sekunde z. B. 300 ccm Wasser hineingepumpt werden und ebensoviel am anderen Ende abfließen, so daß die Röhre immer ganz mit Wasser gefüllt ist, so fließen durch jeden Querschnitt, mag er groß oder klein sein, in jeder Sekunde gerade 300 ccm Wasser. An engeren Stellen der Röhre fließt dann eben das Wasser rascher, an weiteren langsamer. Ganz so ist es beim elektrischen Strome. Die Stärke des Stromes ist überall dieselbe, durch jeden Querschnitt des Stromkreises fließt in einer bestimmten Zeit dieselbe Elektrizitätsmenge hindurch.

Um nun die Stromstärke in irgend einem Stromkreise messen zu können, müssen wir wieder zunächst eine Einheit für sie festsetzen. Wir wollen sagen, derjenige Strom hat die Einheit der Stromstärke, bei welchem in jeder Sekunde gerade ein Coulomb durch jeden Querschnitt fließt. Diese Einheit nennen wir 1 Ampere und drücken also alle Stromstärken in Ampere aus. Durch welche Mittel wir dann die Stromstärke in irgend einem Stromkreis messen, d. h. in Ampere ausdrücken können, wird sich sofort ergeben. Den tausendsten Teil eines Ampere nennt man Milliampere.

Je stärker ein elektrischer Strom ist, desto stärker sind die Wirkungen, die er erzeugt. Wir werden also die Stärke des Stromes erkennen können aus der Größe seiner Wirkungen. Das einfachste Mittel dazu bieten die magnetischen Wirkungen des Stromes, für welche wir oben S. 58 bei dem einfachen Galvanoskop ein Beispiel gesehen haben. Eine andere magnetische Wirkung eines elektrischen Stromes, die wir hier benutzen wollen, ist an dem Apparat in Fig. 39 zu beobachten. Sie besteht darin, daß eine von einem Strom durchflossene Drahtrolle R einen Eisenstab E, der an einer Spiralfeder F aufgehängt ist, in sich hineinzieht, und zwar um so tiefer, je stärker der Strom ist, der durch die Drahtwindungen der Rolle fließt. Man verbindet zu dem Zweck die beiden Schrauben a und b, in welche die Drahtwindungen der Rolle endigen, mit dem galvanischen Element. Hat man nun z. B. einmal an diesem Instrument festgestellt, wie tief der Eisenstab in die Rolle hineingezogen wird, wenn durch die Rolle ein Strom von 1, 2, 3 u. s. w. Ampere hindurchgeht, so kann man offenbar nun immer umgekehrt aus der Stellung des Eisenstabes die Zahl der Ampere bestimmen, welche durch die Rolle hindurchgehen. Auf genau diesem Prinzip beruhen gewisse Meßinstrumente für die Stromstärke, welche man Federgalvanometer nennt. Fig. 40 zeigt ein solches für Demonstrationen eingerichtetes Instrument von Hartmann & Braun in Frankfurt a. M. Man sieht in dem Apparat die Drahtrolle R, den Eisenkern E und die Spirale F, an der er aufgehängt ist. Zum Zwecke der deutlichen Erkennung aus der Ferne ist der Zeiger Z um eine Achse drehbar angebracht, so daß er beim Heruntergehen des Eisenkerns sich nach rechts, beim Heraufgehen nach links dreht, und dabei vor einer Skala spielt, an welcher für jede Stellung die Stromstärke in Ampere gleich angeschrieben ist. Bei a und b wird der Strom vom Element der Rolle R zugeführt. Man kann diese Instrumente, die nach F. Kohlrauschs Angaben konstruiert werden, auch so einrichten, daß sie viel kleinere oder viel größere Stromstärken messen. Für uns genügt es hier vorläufig, daß wir dadurch ein Instrument haben, welches uns die Stromstärken in Ampere zu messen gestattet.

Fig. 39.

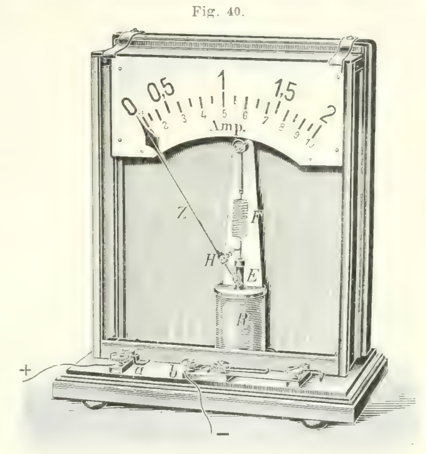


Wovon hängt nun die Stärke eines Stromes ab? Jedenfalls von der Größe der elektromotorischen Kraft des Elementes. Je größer die elektromotorische Kraft ist, welche die Elektrizität bewegt, desto größer kann auch die Menge der Elektrizität sein, die durch jeden Querschnitt pro Sekunde hindurchgeht, d. h. desto größer muß die Stärke des Stromes in dem Stromkreise sein. Und das ist in der Tat der Fall, wie wir uns durch unser Federgalvanometer überzeugen können. Nehmen wir z. B. ein Bunsensches Element und verbinden wir es durch ein Paar dünne Drähte (warum sie dünn sein müssen, wird sich bald zeigen) mit dem

Meßinstrument, so erhalten wir eine gewisse Stromstärke, sagen wir von 0,5 Ampere.

Verbinden wir jetzt drei solcher Elemente hintereinander und setzen die Endpole dieser Elemente durch dieselben dünnen Drähte mit den Klemmen des Meßinstrumentes in Verbindung, so zeigt dies jetzt die dreifache Stromstärke, 1,5 Ampere, an.

Fig. 40.



Ebendasselbe Resultat könnten wir mit mehr oder weniger Elementen erhalten. Wir haben danach das Gesetz:

A. Je größer die elektromotorische Kraft ist, die in einem bestimmten Stromkreis wirkt, desto größer ist unter sonst gleichen Umständen auch die Stärke des Stromes. Wird die elektromotorische Kraft zwei-, drei-, viermal so groß als zuerst, so wird auch die Stromstärke zwei-, drei-, viermal so groß. Der eine Faktor, von dem die Stromstärke abhängt, ist dadurch ermittelt und sein Einfluß erkannt.

Außer von der elektromotorischen Kraft hängt aber die Stromstärke noch ab von der Art und Gestalt und Größe der Körper, durch welche die Elektrizität fließt.

Wir haben uns früher schon überzeugt, daß alle Körper dem Durchgang der Elektrizität einen gewissen Widerstand entgegensetzen, die Isolatoren einen außerordentlich großen, die Halbleiter einen kleineren, die Leiter einen verhältnismäßig sehr kleinen. Je größer nun der Widerstand ist, den ein Strom in seinem gesamten Stromkreis zu überwinden hat, desto weniger Elektrizität kann unter sonst gleichen Umständen in einer bestimmten Zeit, z. B. in einer Sekunde, durch einen Querschnitt gehen, desto geringer ist also die Stärke des Stromes. Es hängt also die Stromstärke noch ab von dem gesamten Widerstande, den der Strom in seiner Bahn zu überwinden hat. Dieser Widerstand setzt sich aber aus verschiedenen Teilen zusammen. Er besteht aus dem Widerstand, den das Element selbst, also seine Metalle und seine Flüssigkeiten dem Strom darbieten, und er besteht aus dem Widerstand des Verbindungsdrahtes, resp. aller der Drähte, durch die der Strom zu fließen hat, also z. B. wenn der Strom durch unser Federgalvanometer geht, auch aus dem Widerstand der Drahtrolle desselben. Was wir speziell unter Widerstand verstehen, werden wir nachher auseinandersetzen. Jedenfalls haben wir den Satz:

B. *Je größer der gesamte Widerstand des Stromkreises ist, um so geringer ist die Stärke des Stromes.* Wird der gesamte Widerstand doppelt, dreifach, vierfach so groß als er war (während die elektromotorische Kraft ungeändert bleibt), so wird die Stärke des Stromes bloß die Hälfte, ein Drittel, ein Viertel von der ursprünglichen.

Diese beiden Gesetze A und B zusammen nennt man das *Ohmsche Gesetz.* Dieses Gesetz ist von höchster Wichtigkeit für die gesamte Elektrizitätslehre.

Wir können das Ohmsche Gesetz in folgender Form aussprechen:

In jedem einfachen geschlossenen Stromkreis ist die Stromstärke gleich der elektromotorischen Kraft dividiert durch den ganzen Widerstand:

$$\text{Stromstärke} = \frac{\text{elektromotorische Kraft}}{\text{Widerstand}}.$$

Dieses Ohmsche Gesetz gilt für jeden galvanischen Strom, wenn man nur alle in einem Stromkreis vorhandenen elektromotorischen Kräfte und alle Widerstände berücksichtigt.

Wir müssen nun zunächst näher bestimmen, wie der Widerstand von Leitern abhängt von der Größe und Gestalt, dem Stoffe und der Anordnung derselben.

In den meisten Anwendungen des galvanischen Stromes ist der Weg, durch den die Elektrizität fließt, ein Draht, oder hat wenigstens die Form eines Drahtes. Man nimmt Kupferdrähte oder Platindrähte oder Eisendrähte, um den Strom durchzuleiten. Aber auch, wenn der elektrische Strom durch eine Flüssigkeit fließt, kann man deren Form als die eines Drahtes ansehen. Man kann von der Länge der durchlaufenen Flüssigkeit sprechen und von ihrem Querschnitt. Untersuchen wir also, wie sich der Widerstand eines Drahtes mit seiner Länge, seinem Querschnitt und seinem Material ändert.

Wir nehmen ein bestimmtes galvanisches Element, z. B. einen Daniell, und verbinden seine Pole mit unserem Federgalvanometer durch zwei Kupferdrähte von ganz bestimmtem Querschnitt und zusammen ganz bestimmter Länge, z. B. der Länge von 10 m. Dann zeigt unser Meßinstrument eine bestimmte Stromstärke an. Ersetzen wir dann die Drähte von 10 m Länge durch genau ebenso dicke Kupferdrähte von 20 m Länge, so bekommen wir eine andere, kleinere Stromstärke, und machen wir dieselbe Operation mit gleich dicken Kupferdrähten von 30, 40, 50 m u. s. w. Länge, so bekommen wir immer kleinere Stromstärken. Die elektromotorische Kraft des Elementes, der Widerstand der Flüssigkeiten im Element und der Widerstand des Drahtes im Federgalvanometer sind unverändert geblieben. Bloß der Widerstand der Verbindungsdrähte ist ein anderer geworden und dadurch auch die Stromstärke. Wir können daher berechnen, wie sich der Widerstand von Drähten von gleichem Material und gleicher Dicke verändert, wenn die Länge variiert wird. Und so findet man, daß, wenn die Länge eines Drahtes die zwei-, drei-, vierfache wird, auch der Widerstand des Drahtes der zwei-, drei-, vierfache wird. Es ergibt sich also daraus das Gesetz:

a) Der Widerstand eines Drahtes von bestimmtem Material und bestimmtem Querschnitt ist um so größer, je größer seine Länge ist.

Auf ganz dieselbe Weise können wir untersuchen, wie sich der Widerstand eines Drahtes ändert, wenn sich der Querschnitt ändert. Wir nehmen eine Reihe von Kupferdrähten von ein und derselben Länge, deren Querschnitte aber verschieden sind, und lassen der Reihe nach den Strom aus einem Element durch jeden von ihnen fließen. Dann können wir aus den verschiedenen Stromstärken, die uns unser Galvanometer angibt, die Größe des Widerstandes der verschiedenen Drähte berechnen und auf diese Weise finden wir:

b) Der Widerstand von Drähten bei gleichbleibendem Material und gleichbleibender Länge ist um so kleiner, je größer ihr Querschnitt ist.

Wird der Querschnitt zwei-, drei-, viermal so groß, so ist der Widerstand bloß die Hälfte, ein Drittel, ein Viertel des ursprünglichen.

Die Form des Querschnitts, ob er kreisförmig oder viereckig oder unregelmäßig ist, ist gleichgültig. Nur auf seine Größe kommt es an.

Wir haben damit die Gesetze gefunden, wie der Widerstand eines Drahtes abhängt von seiner Größe und Gestalt. Der Widerstand hängt aber auch wesentlich ab von der Art des Stoffes, aus welchem der Leiter besteht. Ein Kupferdraht von z. B. 1 m Länge und 1 qmm Querschnitt hat einen anderen Widerstand als ein Aluminiumdraht von derselben Länge und demselben Querschnitt. Legt man daher z. B. den Widerstand eines Kupferdrahtes von bestimmter Länge und bestimmtem Querschnitt als Einheit zu Grunde, so kann man für jedes andere leitende Material eine Zahl bestimmen, welche angibt, wie viel mal dessen Widerstand bei derselben Länge und demselben Querschnitt größer oder kleiner ist. Diese Zahl nennt man den spezifischen Widerstand des Leiters, bezogen auf Kupfer als Einheit. Wir werden weiter unten Tabellen über die spezifischen Widerstände vieler Metalle und anderer Leiter geben. Hier sei nur das Beispiel angeführt, daß der spezifische Widerstand von Eisen 6,10 ist, bezogen auf Kupfer als Einheit, der von Neusilber 18,8. Das heißt also, ein Eisendraht hat immer einen 6,10mal so großen Widerstand als ein Kupferdraht von derselben Länge und demselben Querschnitt, ein Neusilberdraht gar einen 18,8mal so großen Widerstand.

Nachdem wir so gesehen haben, wie der Widerstand eines Leiters von seiner Länge, seinem Querschnitt und seinem Material abhängt, können wir das Gesetz aussprechen:

c) Der Widerstand eines Leiters ist gleich seinem spezifischen Widerstand, multipliziert mit seiner Länge, dividiert durch seinen Querschnitt:

$$\text{Widerstand eines Leiters} = \text{spezifisch. Widerstand} \times \frac{\text{Länge}}{\text{Querschn.}}.$$

Dies gilt für Leiter jeder Art, sowohl für feste Leiter — wie Metalle, Kohle — als für flüssige Leiter, also auch für die Flüssigkeiten in galvanischen Elementen.

Wir wollen nun zunächst auch für den Widerstand eine Einheit festsetzen, um alle Widerstände gleichartig bezeichnen zu können. Man ist international übereingekommen, als Einheit des Widerstandes denjenigen zu nehmen, welchen ein Quecksilberfaden von 106,3 cm Länge und 1 qmm Querschnitt bei 0° zeigt. Diesen Widerstand nennt man 1 Ohm. Wir werden also alle Widerstände in Ohm ausdrücken. Dieser Widerstand, 1 Ohm, steht nämlich mit den von uns schon eingeführten Einheiten der elektromotorischen Kraft und der Stromstärke in dem Zusammenhang, daß

Fig. 41.

$$1 \text{ Ampere} = \frac{1 \text{ Volt}}{1 \text{ Ohm}}$$

ist.

Mit den bisherigen Kenntnissen können wir zunächst den Widerstand von galvanischen Elementen genauer untersuchen.

Nehmen wir ein galvanisches Element, z. B. einen Daniell, und verbinden wir seine Pole durch einen Draht von einem bestimmten Widerstand, so fließt durch diesen geschlossenen Stromkreis ein Strom, dessen Stärke gleich der elektromotorischen Kraft des Daniells dividiert durch den gesamten Widerstand ist. Der gesamte Widerstand setzt sich zusammen aus dem des Drahtes und dem des Elementes selbst, welchen man den inneren Widerstand des Elementes nennt.

Schaltet man nun eine Reihe von Daniell hintereinander, wie in Fig. 41, so fließt der Strom von dem positiven Pol (+) durch den äußeren Verbindungsdraht zum negativen Pol (—), und dann durch die Kette zurück zum + Pol, d. h. vom achten Element zum siebenten, von diesem zum sechsten u. s. w.

Es ist bei dieser Anordnung immer das Zink des einen Elementes mit dem Kupfer des anderen verbunden. Die elektromotorische Kraft, die in dieser Kette wirkt, ist also die achtfache eines einzigen Daniell (S. 49). Aber auch der innere Widerstand der ganzen Kette ist der achtfache eines Daniell, weil der Strom jetzt die achtfache Länge der Flüssigkeit bei gleichem Querschnitt zu durchlaufen hat. Die gesamte Stärke des Stromes ist also

$$\text{Stromstärke} = \frac{\text{achtfache elektromotorische Kraft eines Daniell}}{\text{Drahtwiderstand} + \text{achtfacher innerer Widerstand eines Daniell}}.$$

Ist nun z. B. der Drahtwiderstand sehr klein gegenüber dem inneren Widerstand eines Daniell, so daß man ihn vernachlässigen kann, so ist nahezu

$$\text{Stromstärke} = \frac{\text{elektromotorische Kraft eines Daniell}}{\text{innerer Widerstand eines Daniell}}.$$

Man gewinnt also dann gar nichts an Stromintensität, wenn man die 8 Elemente hintereinander schaltet. Der Gesamtstrom ist ungefähr ebenso stark, als wenn man nur einen Daniell genommen hätte.

Ist dagegen der Drahtwiderstand sehr groß, viel größer als der gesamte Widerstand der Kette, so hat man nahezu

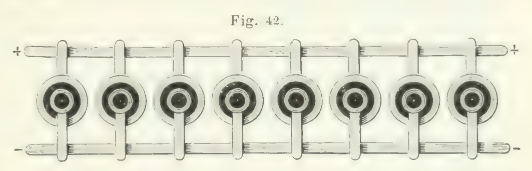
$$\text{Stromstärke} = \frac{\text{achtfache elektromotorische Kraft eines Daniell}}{\text{Drahtwiderstand}}.$$

Jetzt ist also die Stromstärke nahezu 8mal so groß, als wenn man nur einen Daniell anwendet.

Es ergibt sich also die Regel: Ist der Widerstand des Verbindungsdrahtes einer Kette, des äußeren Stromkreises, sehr groß gegen den inneren Widerstand der Kette, so ist es vorteilhaft, die Elemente hintereinander zu einer Kette zu schalten, um eine möglichst große Stromstärke zu erhalten.

Man kann aber eine Reihe von Elementen auch anders verbinden, nämlich so, daß man alle Kupferplatten miteinander verbindet und ebenso alle Zinkplatten. Eine solche Anordnung ist in Fig. 42 dargestellt. Man sagt dann, die Elemente seien nebeneinander geschaltet oder parallel geschaltet. Hier sind die Verhältnisse ganz anders. Alle die Kupferzylinder bilden zusammen eine große Kupfermasse und alle die Zinkzylinder eine große Zinkmasse, die der Kupfermasse gegenübersteht. Die elektromotorische Kraft hängt aber, wie wir wissen, gar nicht von der Größe der Kupfer- und Zinkmassen ab, sie ist also in dieser Kettenanordnung einfach gleich der eines einzigen Daniell. Die elektromotorische Kraft wird also durch eine derartige Anordnung von Elementen nicht erhöht. Aber der innere Widerstand dieser Kette ist ein kleinerer als der eines einzigen Daniell. Denn denkt man sich alle Flüssigkeiten und Metalle zusammen in einem Gefäß, so ist der Querschnitt der Flüssigkeiten, durch den der Strom fließt, jetzt 8mal so groß wie bei einem Daniell. Folglich ist der innere Widerstand dieser Kette bloß der achte Teil von dem inneren Widerstand eines Daniell. Verbindet man jetzt die Pole dieser Kette (die in der Figur rechts und links mit + oder — bezeichnet sind) durch den äußeren Verbindungsdraht, so hat man

Fig. 42.



$$\text{Stromstärke} = \frac{\text{elektromotorische Kraft eines Daniell}}{\text{Drahtwiderstand} + {}^1/_8 \text{ innerer Widerstand eines Daniell}}.$$

Jetzt sind die Verhältnisse gerade die entgegengesetzten wie früher, bei Hintereinanderschaltung der Elemente.

Ist nämlich der Drahtwiderstand klein gegen den inneren Widerstand der Kette, so ist die

$$\text{Stromstärke} = \frac{\text{elektromotorische Kraft eines Daniell}}{{}^1/_8 \text{ innerer Widerstand eines Daniell}},$$

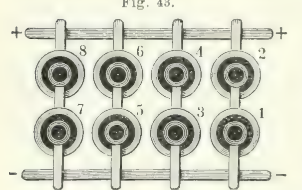
also die Stromstärke nahezu 8mal so groß wie bei einem Daniell. Ist dagegen der Drahtwiderstand sehr groß, so ist die

$$\text{Stromstärke} = \frac{\text{elektromotorische Kraft eines Daniell}}{\text{Drahtwiderstand}}.$$

Dann ist also die Stromstärke nahezu dieselbe wie bei einem einzigen Daniell. Man gewinnt also dann gar nichts an Stromstärke.

Man kann auch eine Reihe von Elementen teils hintereinander, teils nebeneinander schalten, wie in Fig. 43 und 44 an zwei Beispielen dargestellt ist.

Fig. 43.



In Fig. 43 sind immer je 2 Daniell hintereinander und 4 nebeneinander geschaltet. Es ist also der innere Widerstand dieser Kette $= \frac{2}{4} =$ dem halben Widerstand eines einzelnen Elements, denn die Flüssigkeit hat die doppelte Länge und den vierfachen Querschnitt als in einem einzigen Element. Die *elektromotorische Kraft* ist dabei gleich 2 Daniell, weil nur je 2 Elemente hintereinander geschaltet sind. Dagegen in Fig. 44 sind 4 Elemente hintereinander und je 2 parallel geschaltet. Der innere Widerstand dieser Kette ist also $\frac{4}{2}$, d. h. doppelt so groß wie der eines einzelnen Elements, und die elektromotorische Kraft ist gleich der von 4 Daniell.

Wenn man ein Element oder eine Kette durch einen sehr kleinen äußeren Widerstand, z. B. durch einen kurzen dicken Draht, schließt, so sagt man, das Element oder die Kette ist *kurzgeschlossen*. Die Stromstärke wird dann in jedem Fall die größte, die das betreffende Element überhaupt liefern kann, sie ist nämlich gleich der elektromotorischen Kraft des Elementes selbst, dividiert durch seinen inneren Widerstand. Man sieht, daß, um bei der *Kurzschließung* aus einem Element eine recht hohe Stromstärke erhalten zu können, es vorteilhaft ist, daß das Element selbst einen sehr kleinen inneren Widerstand besitzt.

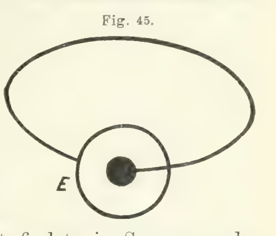
Fig. 44.

Das einfache Schema eines geschlossenen Stromkreises, wie wir ihn bisher allein betrachteten, ist in Fig. 45 dargestellt. Darin ist E ein galvanisches Element, und der Verbindungsdraht geht von dem einen Pol des Elements zum anderen. Er kann dabei durch viele Apparate gehen, aber es ist immer ein einziger unverzweigter Draht.

Um die Verhältnisse in einem solchen einfachen Stromkreis noch näher zu untersuchen, wollen wir das Schema in Fig. 46 benutzen. Dasselbe stellt in seinem unteren Teil ZgK eine mit verdünnter Schwefelsäure gefüllte Glasröhre dar, der obere Teil ZbK stellt einen Draht dar. Bei Z befindet sich eine Zinkplatte, bei K eine Kupferplatte. Die Kupferplatte hat positive Spannung, die Zinkplatte eine ebenso große negative Spannung. Auf dem Draht KbZ herrscht an allen Stellen eine andere Spannung, und

zwar nimmt dieselbe von dem positiven Wert bei K allmählich durch Null hindurch ab bis zu dem negativen Werte bei Z. An einer Stelle ist also die Spannung Null und zwar, wenn der Draht aus einem überall gleich dicken Metalldraht besteht, bei b, gerade in der Mitte zwischen K und Z. Entsprechendes findet in der unteren Hälfte der Figur statt. Die an K anliegende Schicht der Schwefelsäure hat negative, die an Z anliegende positive Spannung, und in der unteren Hälfte nimmt also die Spannung von Z bis K ab. Auch hier ist an einem Punkt in der Mitte, etwa bei g, die Spannung Null. An den Metallen selbst findet ein Sprung der Spannung statt, hervorgebracht durch die elektrische Scheidungskraft.

Fig. 45.



Untersuchen wir nun die Verteilung der Spannung auf dem Draht allein. Denken wir uns denselben, wie in Fig. 47, gerade gestreckt und aus einem homogenen Metall bestehend, A B, so herrscht am Anfang desselben in A die positive Spannung, die wir uns durch die Strecke A M repräsentiert denken können, am Ende B die ebenso große negative Spannung, die durch die Linie B N repräsentiert sei. An den zwischenliegenden Stellen a b c d e hat die Spannung dann die Werte, deren Größe durch die Linien a α, b β, c γ, d δ, e ε dargestellt ist. In der Mitte des Leiters ist die Spannung Null. Zwischen je zwei Punkten des Drahtes herrscht also eine Spannungsdifferenz. So ist die Spannung in a größer als die in b um die Größe a α — b β, die an a größer als die an e um a α + e ε u. s. w. An zwei beliebigen Punkten des Drahtes hat also die Spannung verschiedene Werte, und gerade deswegen strömt die Elektrizität durch den Draht; denn die positive Elektrizität bewegt sich stets von Stellen höherer zu Stellen geringerer Spannung. In jedem Stück eines solchen Drahtes gilt also nun wieder ein ähnliches Gesetz wie in dem ganzen geschlossenen Stromkreis. Die Stromstärke, d. h. die Menge der in einer Sekunde durchfließenden Elektrizität in einem Stück eines Drahtes, hängt ab von dem Spannungsunterschied an den beiden Enden dieses Stückes und von dem Widerstand dieses Stückes.

Fig. 46.

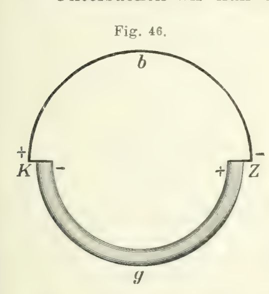
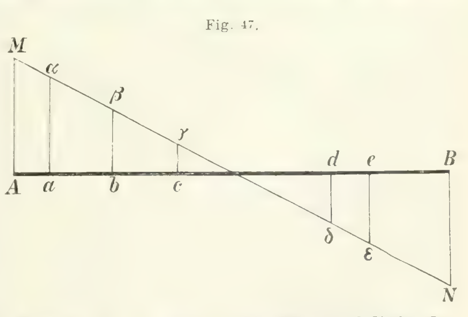


Fig. 47.



Da die Stromstärke in dem ganzen Draht überall dieselbe ist, so gilt für jedes Stück eines Drahtes das Gesetz:

$$\text{Stromstärke} = \frac{\text{Spannungsunterschied an den Endpunkten eines Drahtstückes}}{\text{Widerstand des Drahtstückes}}.$$

Dafür kann man auch umgekehrt sagen:

Spannungsunterschied an den Enden = Stromstärke × Widerstand des Drahtstückes,

oder die Spannung am Ende eines Drahtstückes ist kleiner als am Anfang, und zwar um das Produkt aus der Stromstärke und dem Widerstand des Drahtstückes. Dies kann man zweckmäßig so ausdrücken: beim Durchströmen durch ein Drahtstück verliert der Strom an Spannung, erleidet er einen Spannungsverlust, welcher gleich der Stromstärke multipliziert mit dem Widerstand des Drahtstückes ist. Die Überwindung eines jeden Widerstandes durch den Strom ist also mit einem bestimmten Spannungsverlust verbunden, der um so größer ist, je größer der überwundene Widerstand ist. Auf dem Wege b c in Fig. 47 erleidet also der Strom einen Spannungsverlust, welcher gleich $b\beta - c\gamma$ ist, auf dem Wege a e einen Verlust der Spannung, welcher gleich $a\alpha + e\varepsilon$ ist.

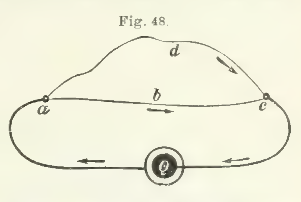
Am Zink selbst und am Kupfer selbst erfährt die Spannung durch die elektrische Scheidekraft eine sprungartige Änderung. Vom Zink zur angrenzenden Flüssigkeit findet eine Spannungszunahme und ebenso von der angrenzenden Flüssigkeit zum Kupfer eine solche infolge der Scheidungskräfte statt. Fließt nun der Strom vom Kupfer außen zum Zink und vom Zink innen durch die Flüssigkeit zum Kupfer, so muß der Spannungsverlust, den er auf dem ganzen Wege erfährt, gleich sein dem Spannungsgewinn, den er am Zink und am Kupfer durch die Scheidungskräfte bekommt. Also muß der Spannungsverlust auf dem äußeren Verbindungsdraht + Spannungsverlust im Inneren des Elementes = Spannungsgewinn am Zink + Spannungsgewinn am Kupfer sein. Letztere beiden Spannungszunahmen zusammen sind aber nichts anderes, als was wir die elektromotorische Kraft des Elementes genannt haben. Und wir können daher sagen, die elektromotorische Kraft der Kette ist, wenn der Strom fließt, gleich dem Spannungsverlust im äußeren + dem Spannungsverlust im inneren Stromkreis. Der Spannungsverlust im äußeren Stromkreis ist aber nichts anderes als der Spannungsunterschied an den Polen des geschlossenen Elementes. Man bezeichnet ihn gewöhnlich als die Klemmenspannung. Und wir können daher auch unseren Satz so ausdrücken: die elektromotorische Kraft eines Elementes ist gleich der Klemmenspannung + dem Spannungsverlust im Inneren des Elementes. Daraus sieht man, daß die Klemmenspannung an einem geschlossenen Element kleiner ist als die elektromotorische Kraft des Elementes, und zwar kleiner um den Betrag des Spannungsverlustes im Innern des Elementes, d. h. um das Produkt aus Stromstärke und innerem Widerstand.

Bisher betrachteten wir immer einen einfachen geschlossenen Kreis, in dem der Strom fließt.

Man braucht aber für elektrische Untersuchungen und Anwendungen oft einen allgemeineren Fall. Man läßt nämlich den Strom durch eine

verzweigte Leitung gehen, wie sie in einem einfachen Falle in Fig. 48 dargestellt ist. Darin kommt der elektrische Strom in der Richtung des Pfeiles aus dem Element Q, fließt zuerst wie gewöhnlich bis a, dann aber verzweigt er sich und fließt sowohl durch d als durch b in der Richtung der Pfeile, bis er nach c kommt. Dort vereinigen sich die beiden Stromzweige wieder und nun fließt er wie früher zum Element zurück. Auch für diesen Fall der Stromverzweigung lassen sich die Gesetze aus der oben angeführten Verallgemeinerung des Ohmschen Gesetzes ableiten.

Fig. 48.



Zunächst ergibt sich hierbei, daß die Stromstärke nun nicht mehr in der ganzen Leitung dieselbe ist, sondern daß vielmehr in den verschiedenen Zweigen des Stromkreises verschiedene Stromstärken herrschen. Am Punkt a ist eine bestimmte Spannung vorhanden, am Punkt c eine andere. Durch den Spannungsunterschied zwischen a und c wird die Elektrizität sowohl durch a b c, als durch a d c getrieben. Es ist folglich:

$$\text{die Stromstärke in a b c} = \frac{\text{Spannungsunterschied zwischen a und c}}{\text{Widerstand von a b c}}$$

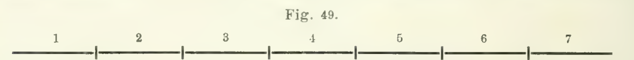
$$\text{und die Stromstärke in a d c} = \frac{\text{Spannungsunterschied zwischen a und c}}{\text{Widerstand von a d c}}.$$

Daraus folgt, daß sich die Stromstärken in den beiden Zweigen umgekehrt wie ihre Widerstände verhalten. In dem unverzweigten Teil der Leitung a Q c ist die Stromstärke die Summe von den beiden Zweigstromstärken. Haben also z. B. die beiden Zweige gleichen Widerstand, so fließt durch jeden ein Strom, dessen Stärke bloß die Hälfte von der des Hauptstromes ist. Hat z. B. das Stück a d c in der Figur einen doppelt so großen Widerstand wie das Stück a b c, so ist der Strom, der durch a d c fließt, nur halb so stark wie der, der durch a b c fließt, und die Summe der Stromstärken in den beiden Zweigen ist gleich der Stromstärke in dem ungeteilten Stück des Stromes.

Der Widerstand der beiden Zweige des Leiters zusammen gegen den Strom ist hier nicht etwa gleich der Summe der Widerstände der beiden Leiter, sondern viel kleiner, kleiner als der Widerstand jedes einzelnen Leiters allein genommen. Man kann das sofort erkennen, wenn man z. B. annimmt, die beiden Zweige seien gleich lang und haben gleichen Querschnitt. Dann fließt der Strom von a aus durch beide Zweige zu gleicher Zeit, und dies ist dasselbe, als ob nur ein einziger Leiter von a bis c ginge, aber mit einem doppelt so großen Querschnitt. Der Widerstand dieses Leiters ist dann, wie wir wissen, nur die Hälfte des früheren. Also diese beiden gleich langen und gleich dicken Zweige des Leiters haben zusammen nur einen Widerstand, der gleich der Hälfte des Widerstandes jedes einzelnen Leiters ist. Das ist ein sehr wichtiger Satz. Man sagt von zwei oder mehr Leitern, deren Anfangspunkte alle miteinander ver-

bunden sind und deren Endpunkte auch miteinander verbunden sind, sie seien *nebeneinander geschaltet* oder auch *parallel geschaltet*, während man von Leitern, die so verbunden sind, daß der Anfangspunkt des einen mit dem Endpunkt des anderen verbunden ist, sagt, sie seien *hintereinander geschaltet* oder in *Serie*

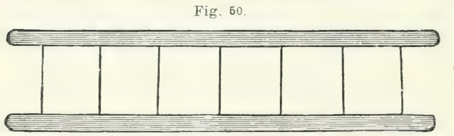
Fig. 49.



geschaltet. Diese Bezeichnungen sind ganz analog den oben erwähnten bei der Verbindung von galvanischen Elementen.

Haben wir also z. B. 7 Drähte, alle von gleichem Widerstand, und verbinden wir sie wie in Fig. 49, so ist der Widerstand dieser zusammenhängenden Drähte der siebenfache von jedem einzelnen. Die Drähte sind dabei *hintereinander* geschaltet.

Fig. 50.



Verbinden wir aber die Drähte wie in Fig. 50, so ist der Widerstand der 7 Drähte zusammen gegen den Strom bloß $^1/_7$ von dem jedes einzelnen, also bloß $^1/_{49}$ von dem in Fig. 49. Die Drähte sind dabei, wie man es nennt, *nebeneinander* oder *parallel* geschaltet.

Man kann sich dieses Verhalten wieder leicht klarmachen, wenn man an die Bewegung einer wirklichen Flüssigkeit, des Wassers, denkt.

Läßt man aus einem Reservoir Wasser durch eine Röhre von 5 m Länge und einem bestimmten Querschnitt ausfließen, so wird die in einer Minute ausfließende Wassermenge abhängen von der Reibung in der Röhre, die wir mit dem Widerstand eines Leiters identifizieren können. Hat die Röhre statt 5 m die doppelte Länge, 10 m, so ist die Reibung auch die doppelte, es fließt also weniger Wasser in der Minute aus.

Fig. 51.

Hat man dagegen statt einer Ausflußröhre von 10 m Länge zwei nebeneinander von je 5 m Länge, so fließt durch diese die doppelte Wassermenge aus als durch eine. Es kommt zwar die Reibung bei jeder Röhre in Betracht, aber durch zwei gleich lange und dicke Röhren fließt eben die doppelte Wassermenge in der Minute aus.

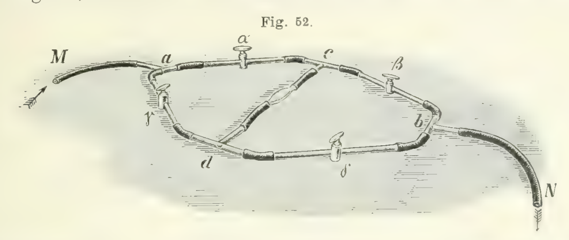
Qualitativ genau so ist es bei der Elektrizität. Je mehr Drähte man hintereinander schaltet, desto größer ist der Widerstand des Systems, desto kleiner wird die Stromstärke bei gleicher elektromotorischer Kraft; je mehr man nebeneinander schaltet, desto kleiner wird der Widerstand, desto größer die Stromstärke.

Man kann die Stromverzweigung noch komplizierter machen. Man kann die beiden Zweige einer Leitung wieder durch einen Draht miteinander verbinden, wie in Fig. 51.

Hier sind die beiden Zweige a d b und a c b , die sich an das Element E anschließen, noch durch einen Draht c d verbunden. Diesen Draht nennt man die Brücke und die ganze Verzweigung, die sehr wichtig ist, „Brückenverzweigung".

Wenn man sich ein ebensolches System aus Röhren gebildet denkt, wie in Fig. 52, durch welche Wasser strömt, so kann man eine wichtige

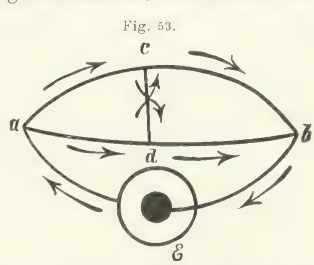
Fig. 52.



Eigenschaft dieser Anordnung sofort erkennen. Durch den Schlauch bei M läßt man aus der Wasserleitung immer nach a hin Wasser strömen, welches durch die Röhren ac und c b einerseits und durch die Röhren a d und d b andererseits nach b fließt, von wo es durch den Schlauch N abfließt. Dann sucht in dem Verbindungsstück c d zu gleicher Zeit das Wasser von c nach d nach unten und von d nach c nach oben zu fließen. Man kann nun offenbar die Stärke der Strömung in den vier Röhren durch die Hähne α, β, γ, δ so regulieren, daß in dem Rohr c d das Wasser stillsteht, sich gar nicht bewegt, daß also z. B. ein leichter Flügel, der in dem Glasrohr zwischen c und d angebracht ist, in Ruhe bleibt.

Ganz ebenso ist es nun bei elektrischen Strömen. In der Brücke nämlich treffen sich, wie die Pfeile in Fig. 53 andeuten, zwei Ströme von entgegengesetzter Richtung, die sich gegenseitig schwächen. Von a c fließt der Strom nach unten in die Brücke hinein, von a d nach oben. Es ist daher die Möglichkeit vorhanden, daß durch die Brücke ein Strom von der Stärke Null, d. h. gar kein Strom fließt, während sonst das ganze System von Strömen durchflossen ist. Es wird diese Möglichkeit davon abhängen, wie sich die Widerstände in den vier Teilen a d, a c, b d und b c zueinander verhalten, ganz so, wie es bei der Wasserströmung auf die Stellung der Hähne ankommt. Dies läßt sich hier aus unserer Verallgemeinerung des Ohmschen Gesetzes für Drahtstücke genau präzisieren.

Fig. 53.



In welchem Fall wird durch die Brücke kein Strom fließen?

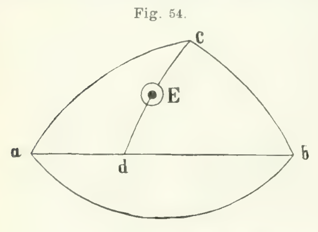
Wenn durch die Brücke c d kein Strom fließen soll, so muß die Spannung an c gleich der Spannung an d sein, denn nur dann fließt kein Strom durch c d. Daher muß dann auch der Spannungsverlust auf dem Wege a c

gleich dem auf dem Wege a d, und der Spannungsverlust auf dem Wege c b gleich dem auf dem Wege d b sein. Da nun durch die Brücke kein Strom fließen soll, so können wir uns diesen Draht ganz entfernt denken und daher muß auch die Stromstärke in a c gleich der in c b sein, und ebenso die in a d gleich der in d b. Daraus ergibt sich sofort, daß, wenn in der Brücke kein Strom fließen soll, die Beziehung bestehen muß:

$$\frac{\text{Widerstand von a c}}{\text{Widerstand von a d}} = \frac{\text{Widerstand von c b}}{\text{Widerstand von d b}}.$$

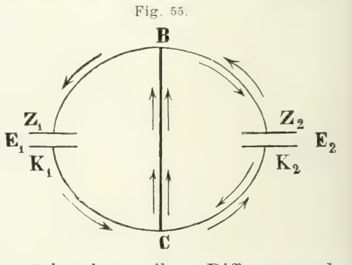
Man erkennt daraus leicht, daß es möglich ist, auf diese Weise den Widerstand eines Drahtes mit dem eines anderen zu vergleichen, eine Methode, die wir im folgenden zu beschreiben haben werden. Sie ist zuerst von Wheatstone angegeben worden, und daher heißt diese ganze Art von Stromverzweigung die Wheatstonesche Brücke. Man kann auch, wie in Fig. 54, das Element in die Brücke c d bringen, dann fließt, wie sich ebenso ergibt, im Zweig a b kein Strom, wenn die vier Widerstände in demselben angegebenen Verhältnisse stehen. Die durch Fig. 54 angegebene Anordnung der Wheatstoneschen Brücke wird oft benutzt.

Fig. 54.



Eine noch weitergehende Komplikation kann man in die Stromverzweigung dadurch einführen, daß man in einzelne Zweige noch galvanische Elemente einführt, die von sich aus wieder Ströme erzeugen. Wenn in einem Zweig eines verzweigten Stromkreises noch ein Element sich befindet, so wird die Elektrizität durch diesen Zweig nicht bloß vermöge des von außen herrührenden Spannungsunterschiedes seiner Endpunkte hindurchgetrieben, sondern auch durch die in ihm herrschende elektromotorische Kraft. Wirken der Spannungsunterschied und die elektromotorische Kraft nach derselben Richtung, so hängt die Stromstärke in diesem Zweig ab von der Summe dieser beiden Größen. Wirken sie einander entgegen, so hängt die Stromstärke ab von ihrer Differenz und in beiden Fällen von dem Gesamtwiderstand des Zweiges.

Fig. 55.



Ein für das folgende wichtiges Beispiel für diese Stromverzweigung, die sogenannte Kompensationsschaltung, ist in Fig. 55 gezeichnet. Darin sind $K_1 Z_1$ und $K_2 Z_2$ zwei Elemente, von denen wir annehmen wollen, daß das zweite eine kleinere elektromotorische Kraft, E_2, hat als das erste, E_1. Diese beiden Elemente seien nun so geschaltet, daß die positiven Pole K_1 und K_2 miteinander und ebenso die negativen Pole Z_1 und Z_2 miteinander verbunden sind. Außerdem sei zwischen zwei beliebigen Punkten

B und C wieder eine Brücke angebracht. Die Pfeile zeigen, daß in dem Zweig B E_2 C (mit kleinerer elektromotorischer Kraft) sich zwei Ströme entgegenfließen, und es wird daher die Möglichkeit vorhanden sein, daß in diesem Zweig die Stromstärke Null ist. Unter welchen Verhältnissen kann nun die Stromstärke im Zweige B E_2 C gleich Null sein? Wenn das der Fall sein soll, dann muß der Spannungsunterschied an den Punkten B und C gerade gleich der elektromotorischen Kraft E_2 sein. Daher muß die Stromstärke im Zweige BC gleich der elektromotorischen Kraft von E_2 dividiert durch den Widerstand von BC sein. Andererseits aber können wir, da im Zweige B E_2 C kein Strom fließen soll, uns diesen jetzt ganz fortgelassen denken. Dann fließt im geschlossenen Kreise B E_1 C B ein einziger Strom, es muß also die Stromstärke in BC nach dem Ohmschen Gesetz auch gleich der elektromotorischen Kraft von E_1 dividiert durch den ganzen Widerstand B E_1 C + B C sein.

So findet man, daß dann die elektromotorischen Kräfte von E_1 und E_2 sich verhalten müssen wie die Widerstände einerseits von B E_1 C B, andererseits von B C. Es ergibt sich also

$$\frac{\text{elektromotorische Kraft von } E_1}{\text{elektromotorische Kraft von } E_2} = \frac{\text{Widerstand von B} E_1 \text{CB}}{\text{Widerstand von BC}}.$$

Daraus werden wir später eine Methode entnehmen, um elektromotorische Kräfte miteinander zu vergleichen.

Auf dieselbe Weise, wie es in diesen drei speziellen Fällen geschehen ist, kann man in jedem beliebig komplizierten Fall der Stromverzweigung sich in die Verhältnisse der Stromstärken eine Einsicht verschaffen. Man braucht nur immer für jeden Zweig eines Stromkreises den Spannungsverlust nach der oben gegebenen Definition zu bestimmen. Daß man auf diese Weise die Eigenschaften der verzweigten Ströme finden kann, hat zuerst Kirchhoff gezeigt.

Mit den bisher besprochenen Gesetzen sind die Grundgesetze des galvanischen Stromes, soweit sie seine Stärke, deren Abhängigkeit von der elektromotorischen Kraft der Kette und vom Widerstand des gesamten Schließungskreises betreffen, vollkommen bekannt. Auf diesen Gesetzen basieren die quantitativen Anwendungen des elektrischen Stromes. Um nun aber nicht bloß im allgemeinen qualitativ, sondern im speziellen quantitativ mit Stromstärken, elektromotorischen Kräften und Widerständen rechnen zu können, sind zuerst Meßmethoden für diese elektrischen Größen anzugeben.

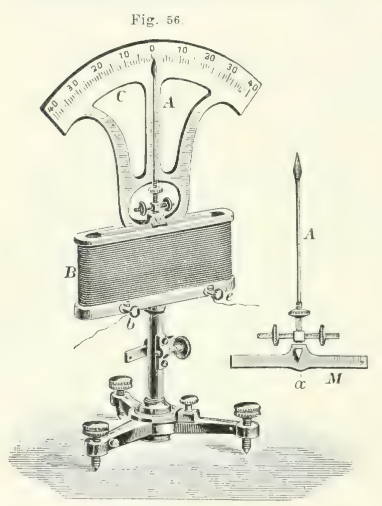
---

4. Kapitel.

Elektrische Apparate und Messungen.

Drei Größen sind es, die bei jedem galvanischen Strom in Betracht kommen, die elektromotorische Kraft, der Widerstand und die Stromstärke. Um mit diesen so einfach und sicher operieren zu können, wie wir es etwa mit Längen, mit Gewichten, mit der Zeit tun, ist es notwendig, daß wir diese drei Größen immer in bestimmten Einheiten ausdrücken und daß wir sie ebenso leicht und sicher messen können, wie wir Längen, Gewichte, Zeiten messen. So wie wir dazu besondere Apparate brauchen, Metermaßstäbe, Wagen, Uhren, so brauchen wir natürlich auch für die elektrischen Messungen gewisse Apparate, die zunächst besprochen werden sollen.

Fig. 56.



Zuvörderst haben wir Instrumente nötig, welche das Vorhandensein eines elektrischen Stromes anzeigen, ohne daß eine genaue Messung seiner Stärke nötig ist, und insbesondere Instrumente, welche schon sehr schwache Ströme anzeigen. Solche Apparate nennt man, wie schon früher erwähnt, Galvanoskope. Sie beruhen zum Teil darauf, daß ein elektrischer Strom, der in Windungen um eine Magnetnadel herumgeführt wird und zwar parallel zu ihr, diese Magnetnadel aus ihrer gewöhnlichen Nord-Südlage herausdreht. In je mehr Windungen der Strom um die Magnetnadel herumgeführt ist und je näher der Strom bei der Nadel vorbeifließt, um so stärker ist diese Wirkung, um so schwächere Ströme werden also schon dadurch angezeigt.

Ein sehr brauchbares Galvanoskop, bei dem der Magnet sich um eine horizontale Achse drehen kann, zeigt Fig. 56, ein sogenanntes Vertikalgalvanoskop. Man sieht in der Figur nebenbei den Magnetstab M besonders gezeichnet, der mit der Schneide α auf eine Unterlage im Innern des Galvanoskops aufgesetzt wird und so sich um eine horizontale Achse drehen kann. An dem Magneten ist ein Zeiger A, gewöhnlich aus Aluminium, befestigt. Das eigentliche Galvanoskop besitzt einen Rahmen B,

der mit Draht, parallel zum Magnetstab, vielfach umwunden ist. Die Enden des Drahtes gehen in die Klemmschrauben b und e. Innerhalb der Drahtwindungen ist der Magnet so aufgesetzt, daß er um eine horizontale Achse drehbar ist, und sowie ein Strom durch die Drahtwindungen geht, dreht sich der Magnet und der Zeiger A spielt vor der Skala C.

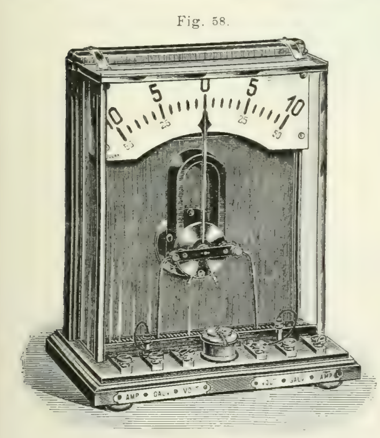
Fig. 57.

Solche Galvanoskope mit vielen Windungen nennt man auch Multiplikatoren. Um Luftströmungen zu vermeiden, sind die Galvanoskope gewöhnlich mit einem Glasgehäuse umgeben.

Fig. 57 zeigt ein ähnliches Vertikalgalvanoskop, welches bei dem Telegraphendienst der Reichspost eingeführt ist. Seine Einrichtung ist nach dem vorhergehenden von selbst verständlich.

Diejenigen Galvanoskope, die nicht bloß zum Anzeigen der Ströme, sondern zu wirklichen Messungen der Stromstärke benutzt werden können, nennt man Galvanometer. Man kann diese nach demselben Prinzip konstruieren, wie die eben erwähnten Galvanoskope, oder wie die S. 63 angeführten Federgalvanometer. Meistenteils werden jetzt aber die Galvanometer so konstruiert, daß man die Drehungen benutzt, die eine bewegliche Drahtrolle, in welcher der zu untersuchende Strom fließt, unter dem Einfluß eines starken Magneten ausführt.

Fig. 58.

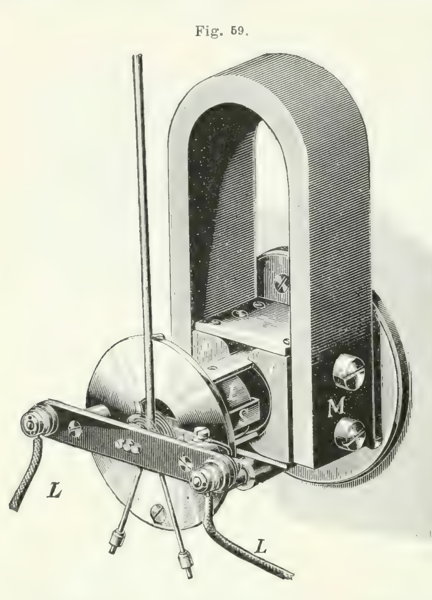


1:6

Ein für Demonstrationen geeignetes Galvanometer, welches die Einrichtung desselben erkennen läßt, ist das in Fig. 58 abgebildete Drehspulengalvanometer von Hartmann & Braun. In Fig. 59 sind die Hauptteile desselben vergrößert und herausgeschoben gezeichnet. Man sieht da einen vertikal stehenden Hufeisenmagnet M, an welchem ausgehöhlte Eisenstücke P, sogenannte Polschuhe, angebracht sind, die in ihre Höhlung den beweglichen Stromkreis aufnehmen. In der Höhlung befindet sich aber zunächst fest ein Eisenzylinder E und in dem Zwischenraum zwischen diesem und den Polschuhen dreht sich eine flache rechteckige Drahtspule S, welche an den vorn sichtbaren Federn befestigt ist und durch die Drähte LL den zu messenden Strom zugeführt erhält. Mit der beweglichen Spule ist ein Zeiger fest verbunden, welcher, wie man in Fig. 58 sieht, sich vor einer Skala drehen kann.

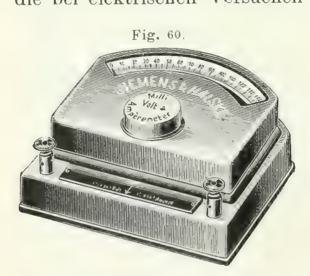
Nach demselben Prinzip, das hier nur kurz angedeutet ist, in Kapitel 7 aber ausführlicher dargelegt wird, werden jetzt die meisten Meßinstrumente konstruiert, welche Stromstärken direkt in Ampere zu messen gestatten und welche man, je nachdem es sich um große Stromstärken oder um kleine handelt, als Amperemeter oder als Milliamperemeter bezeichnet. Ein solches „Präzisionsmilliamperemeter" ist in Fig. 60 in seiner äußeren Ansicht abgebildet. Der äußere Anblick zeigt nur einen Schutzkasten, welcher einen Ausschnitt trägt, durch den eine Skala von 0 bis 150 Teilstrichen und ein bei Null stehendes Ende eines Zeigers sichtbar ist. Das Instrument ist so eingerichtet, daß jeder Teilstrich einem Milliampere entspricht. In die beiden vorn am Gehäuse sichtbaren Klemmen werden die Drähte eingeschaltet, durch welche der zu messende Strom fließt, und das Instrument erlaubt sofort die Stärke dieses Stromes in Milliampere abzulesen.

Fig. 59.



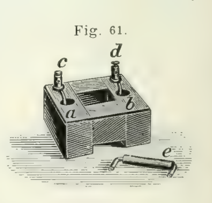
Wir müssen uns ferner mit einigen Hilfsapparaten vertraut machen, die bei elektrischen Versuchen häufig gebraucht werden.

Fig. 60.



Oft will man bei elektrischen Untersuchungen den galvanischen Strom in einem Stromkreis rasch unterbrechen, ohne langwierige Prozeduren, vielmehr durch eine einzige Bewegung. Die einfachste Vorrichtung dazu besteht, wie Fig. 61 zeigt, aus einem kleinen Brett aus Holz oder Paraffin, in welches zwei Vertiefungen (a und b) gebohrt sind, die mit Quecksilber gefüllt werden. In die Quecksilbernäpfe tauchen Drähte ein, die mit den Klemmschrauben c und d verbunden sind. Ein mit einem

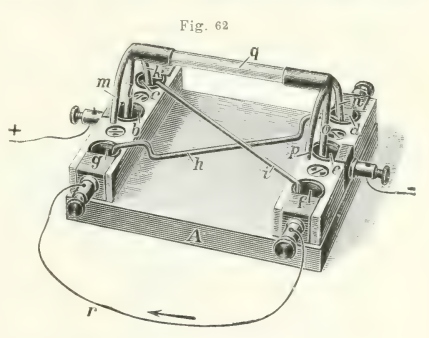
Fig. 61.



Stück Kautschukschlauch umgebener Kupferbügel e kann mit seinen Enden in die Quecksilbernäpfe getaucht oder aus ihnen herausgenommen werden. Führt man also die Leitung von dem einen Pol eines Elementes nach c und von d weiter zu dem anderen Pol, so wird der Strom durch Einsetzen des Bügels geschlossen, durch Herausnehmen geöffnet.

Ferner ist es oft erwünscht, die Stromrichtung in einem Apparat rasch umkehren zu können. Wenn man z. B. ein Galvanoskop mit einem Element verbindet, so fließt der Strom (d. h. immer der positive Strom) in einer bestimmten Richtung durch die Windungen des Galvanoskops, je nachdem man den positiven Pol mit dem einen oder mit dem anderen Ende der Windungen verbunden hat. Will man den Strom in entgegengesetzter Richtung durch die Windungen fließen lassen, so muß man die Verbindung der Pole wechseln. Dies kann man zwar durch Aus- und Einschrauben der Drähte erreichen, was aber Mühe und Zeit kostet. Man hat deshalb Apparate konstruiert, welche diese Umkehrung durch eine Bewegung vorzunehmen gestatten. Man nennt diese Apparate Kommutatoren. Der einfachste und am meisten benutzte Apparat für diesen Zweck ist der Pohlsche Kommutator, Fig. 62. Er besteht aus einer Unterlage von Holz oder Paraffin, in welche sechs Eisennäpfchen eingelassen sind, die mit Quecksilber gefüllt sind. In diese Näpfchen taucht nun ein beweglicher Bügel ein, der aus einem Glasstab q besteht, an dessen beiden Enden je ein metallener Dreifuß angekittet ist. Die mittleren Füße tauchen in die mittleren Quecksilbernäpfchen, von den äußeren kann bald das eine Paar, bald das andere Paar in die ihm entsprechenden Näpfchen eingetaucht werden. Je zwei gegenüberliegende Ecknäpfchen d g und c f sind durch Drähte h und i miteinander verbunden.

Fig. 62



Um den Apparat zu benutzen, führt man von dem Element Drähte zu den Mittelklemmen, die mit den Näpfchen b und e verbunden sind, während man die Enden des Drahtes r, in welchem der Strom rasch umgekehrt werden soll, in die mit den Quecksilbernäpfchen f und g verbundenen Klemmen einführt. Dann sind, je nach der Lage des Bügels, die Näpfe b und e mit den Näpfen g und f entweder direkt oder übers Kreuz verbunden. Bei der in der Figur gezeichneten Lage des Bügels ist nun der Weg des Stromes folgender:

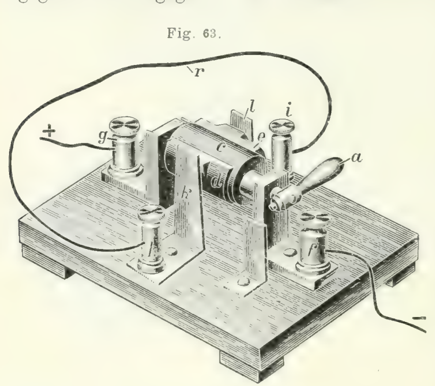
Vom positiven Pol des Elementes nach b, dann durch c, i, f, dann durch den Draht r in Richtung des Pfeiles nach g und durch h, d, e und von dort zum negativen Pol des Elementes.

Legt man aber jetzt den Bügel um, so ist der Weg des Stromes folgender: Vom positiven Pol des Elementes nach b, durch g zum Draht r und durch diesen entgegen der Richtung des Pfeiles nach f und e, und von dort zum negativen Pol des Elementes.

Man hat also durch bloßes Umlegen des Bügels bewirkt, daß der Strom im Draht r das eine Mal in entgegengesetzter Richtung floß wie das zweite Mal.

Ein anderer häufig benutzter Kommutator ist der in Fig. 63 abgebildete Foucaultsche. Seine Wirkungsweise beruht darauf, daß zwei Metallwülste e und d, die sich auf einem Ebonitzylinder c befinden, gegen die Metallbleche l und k gedrückt werden und zwar entweder e gegen l und d gegen k, oder, durch eine Drehung des Zylinders, umgekehrt e gegen k und d gegen l. Die metallische Achse des Zylinders ist nämlich in der Mitte unterbrochen und ein Teil steht mit d, der andere mit e in leitender Verbindung. Die Wirkung des Kommutators ist sonst aus der Figur leicht verständlich. Liegt der Zylinder, wie in der Figur gezeichnet ist, so geht der positive Strom von g durch das metallische Lager nach dem Wulst e, dann durch l zu i und durch den Draht r von i nach h, dann durch k zu d und durch die Achse zu f.

Fig. 63.



Wird der Zylinder aber umgedreht, so geht der Strom von g durch e nach k und h, dann durch den Draht r von h nach i und dann durch l, d, a, f weiter zum Element zurück.

Im Draht r hat also der Strom das eine Mal die entgegengesetzte Richtung wie das andere Mal.

Ist der Zylinder so gestellt, daß e und d gerade sich oben und unten befinden, also nicht gegen k und l drücken, so ist der Strom ganz unterbrochen, da der Zylinder nichtleitend ist.

Mit diesen experimentellen Hilfsmitteln ausgestattet, gehen wir nun zunächst zur näheren Untersuchung des elektrischen Widerstandes der Körper.

Der Widerstand eines Drahtes hängt, wie wir oben S. 65 sahen, ab von seiner Länge, seinem Querschnitt und von seinem Material. Es hat also ein jeder Stoff seine bestimmte Zahl, welche angibt, wievielmal der Widerstand eines Drahtes von bestimmter Länge und bestimmtem Querschnitt aus diesem Material größer oder kleiner ist als der Widerstand z. B. einer Quecksilbersäule oder eines Kupferdrahtes von derselben Länge und demselben Querschnitt. Um die verschiedenen Materialien so durch bestimmte konstante Zahlenwerte zu charakterisieren und diese zugleich

in Beziehung zu dem Ohm, der Widerstandseinheit zu bringen, ist man übereingekommen, den Widerstand, in Ohm ausgedrückt, welchen ein Draht aus einer Substanz von 1 m Länge und 1 qmm Querschnitt besitzt, bei mittlerer Temperatur (18°), als den spezifischen Widerstand der Substanz zu bezeichnen. Den reziproken Wert des spezifischen Widerstandes nennt man die spezifische Leitungsfähigkeit. Ist also z. B. der spezifische Widerstand von Blei 0,20, so ist die spezifische Leitungsfähigkeit desselben $\frac{1}{0,20} = 5$.

Da das Ohm nach S. 66 gleich dem Widerstand eines Quecksilberfadens bei 0° C. von 1 qmm Querschnitt und 1,063 m Länge ist, so ist der spezifische Widerstand des Quecksilbers bei 0° gleich $\frac{1}{1,063} = 0,9407$. Bei 18° ist der spezifische Widerstand des Quecksilbers etwas größer, nämlich = 0,958. Die spezifische Leitungsfähigkeit des Quecksilbers bei 18° ist daher = 1,044.

In der folgenden Tabelle sind die spezifischen Widerstände und die spezifischen Leitungsfähigkeiten einer Reihe von festen Leitern angegeben, giltig für die Temperatur 18°.

Namen der Leiter	Spezifischer Widerstand (Widerstand eines Drahtes von 1 m Länge und 1 qmm Querschnitt in Ohm)	Spezifische Leitungsfähigkeit
Aluminium	0,032	31,3
Blei	0,21	4,8
Eisen	0,09—0,15	6,7—11
Stahl	0,15—0,5	2—6,7
Gold	0,023	43,5
Kupfer (rein)	0,0162	61,7
„ (käuflich)	0,017	58,8
Nickel	0,08—0,11	9—12,5
Platin (rein)	0,108	9,2
„ (käuflich)	0,14	7,1
Quecksilber	0,958	1,044
Silber	0,016	62,5
Tantal	0,16	6,2
Wismut	1,2	0,83
Zink	0.061	16,4
Zinn	0,11—0,14	7,1—9,1

Man sieht aus diesen Zahlen, daß Silber den Strom am besten leitet, nachher kommt gleich Kupfer, welches, wenn es sehr rein ist, fast ebenso gut leitet wie Silber. Die gute Leitungsfähigkeit des Kupfers ist der Grund, warum man für den Durchgang von elektrischen Strömen meistens Kupferdrähte nimmt. Für lange Leitungen, für Telegraphenleitungen, ist das Kupfer allerdings zu teuer, und man bedient sich dann der Eisen- oder Bronzedrähte, deren Kosten viel geringer, deren Leitungsfähigkeit aber auch nur ungefähr der sechste Teil von der des Kupfers ist.

Wegen der praktischen Anwendungen ist noch der Widerstand einiger Kohlen und Metallegierungen in der folgenden Tabelle angeführt:

Namen der Leiter	Spezifischer Widerstand	Spezifische Leitungsfähigkeit
Graphit	13	0,07
Gaskohle	etwa 50	0,02
Konstantan	0,48	2,1
Kruppin (Eisennickellegierung) . . .	0,80	1,25
Neusilber	0,16—0,40	6,3—2,5
Nickelin	0,42	2,4
Rheotan	0,47	2,1
Patentnickel	0,33	3,0
Platinsilber	0,20	5,0
Mangankupfer 12proz.	0,43	2,3
Mangankupfer 30proz.	1,07	0,93
Nickelmangankupfer (Manganin) . .	0,42	2,4

Graphit und Gaskohle leiten den elektrischen Strom ca. tausend, ja viertausendmal schlechter als Kupfer, trotzdem sind sie noch ganz gute Elektrizitätsleiter.

Aus den angegebenen Zahlen für den spezifischen Widerstand kann man nun sofort den Widerstand eines beliebigen Drahtes von beliebiger Länge und beliebigem Querschnitt in Ohm berechnen. Z. B. ein Kupferdraht von 465 cm Länge und $^1/_2$ qmm Querschnitt hat den Widerstand von $\frac{4,65}{^1/_2} . 0,017 = 0,158$ Ohm, während ein Draht aus Manganin von derselben Länge und demselben Querschnitt den Widerstand $\frac{4,65}{^1/_2} . 0,42 =$ 3,9 Ohm besitzt.

Für wissenschaftliche Zwecke charakterisiert man jetzt häufig die verschiedenen Substanzen nicht durch die oben angegebenen Zahlen, die den Widerstand eines Drahtes von 1 m Länge und 1 qmm Querschnitt bedeuten, sondern vielmehr durch Zahlen, welche den Widerstand angeben, den ein Würfel aus der betreffenden Substanz von 1 cm Seitenlänge besitzt. Man nennt einen solchen Würfel einen Zentimeterwürfel und den Widerstand eines Zentimeterwürfels bezeichnet man als den Widerstandskoeffizienten der betreffenden Substanz. Da nun ein solcher Würfel die Länge von 1 cm hat, so hat er deswegen den hundertsten Teil des Widerstandes von einem Draht von 1 m Länge, und da sein Querschnitt 1 qcm ist, so hat er deswegen noch einmal den hundertsten Teil, also im ganzen den zehntausendsten Teil des Widerstandes des Drahtes von den obigen Dimensionen. Wir erhalten also die Widerstandskoeffizienten, wenn wir die oben angeführten spezifischen Widerstände durch 10 000 dividieren. Es ist also z. B. der Widerstandskoeffizient von Aluminium $\frac{0,032}{10\,000} = 0,0000032$. Wenn man für 1 Millionstel Ohm die Bezeichnung 1 Mikrohm einführt, so hat ein solcher Zentimeterwürfel Aluminium den Widerstand 3,2 Mikrohm.

Es sind in den obigen Tabellen nur Leiter erster Klasse — Metalle und Kohle — enthalten. Die Flüssigkeiten, die überhaupt den elektrischen Strom leiten, sind Leiter zweiter Klasse (außer dem Quecksilber) und der Widerstand, den sie dem Durchgang eines Stromes entgegensetzen, ist immer sehr viel größer als der der Metalle. Die meisten untersuchten Flüssigkeiten sind Lösungen von Salzen und Säuren in Wasser. Die spezifische Leitungsfähigkeit derselben hängt von ihrer Konzentration ab, sie ist eine andere bei einer Kupfervitriollösung, die 5 Proz. Kupfervitriol enthält, als bei einer, die 20 Proz. enthält. Außerdem hängt die Leitungsfähigkeit bei den Flüssigkeiten ebenso wie bei den Metallen von der Temperatur ab. Die folgenden Zahlen beziehen sich auf die Temperatur von 18° C. und geben den Widerstand eines Zentimeterwürfels in Ohm und das Reziproke dieser letzteren Größe, welches man schlechtweg die Leitfähigkeit der Substanz nennt.

Vollkommen reines Wasser leitet den elektrischen Strom fast gar nicht, ist also ein fast vollkommener Isolator. Aber die geringsten Beimengungen von fremden Stoffen genügen schon, um Wasser ziemlich gut leitend zu machen.

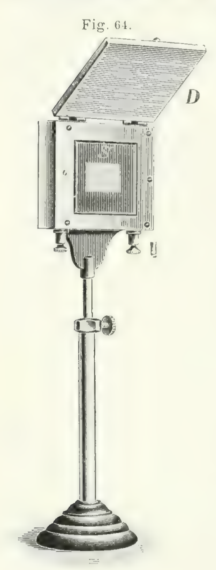
Name der Flüssigkeit	Widerstand eines Zentimeterwürfels in Ohm	Leitfähigkeit
Schwefelsäure von 30,0 Proz.	1,35	0,740
Bittersalzlösung mit 17,4 Proz. Bittersalz . . .	20,3	0,0492
Zinkvitriollösung mit 23,5 Proz. Zinkvitriol . . .	20,9	0,0481
Kochsalzlösung mit Kochsalz gesättigt	4,67	0,214
Essigsäure von 16,6 Proz.	625,0	0,00160

Trotzdem die Flüssigkeiten den Strom sehr viel schlechter leiten als die Metalle, sind sie doch noch sehr gute Leiter gegenüber den eigentlichen Isolatoren, von denen wir ja wissen, daß sie ebenfalls, wenn auch in minimalster Weise, leitend sind. Genaue Zahlen über die spezifische Leitungsfähigkeit der Isolatoren anzugeben, ist nicht möglich, weil die Stromleitung bei ihnen nicht in der einfachen Weise vor sich geht, wie sie durch das Ohmsche Gesetz charakterisiert ist. Es sind daher in der folgenden Tabelle für einige Isolatoren nur ungefähre Zahlenangaben gemacht und zwar geben diese den Widerstand eines Zentimeterwürfels in Millionen Ohm, wofür man die Bezeichnung Megohm eingeführt hat.

Name des Isolators:	Widerstand eines Zentimeterwürfels in Megohm:
Zelluloid	75000
Glas (trocken)	8000000
Glimmer	2300000
Hartgummi	4200000000
Paraffin	3000000000
Stabilit	24000000
Vulkanfiber	53
Olivenöl	1000000
Benzol	1300

Die Leitungsfähigkeit aller Leiter, der Metalle sowohl wie der Flüssigkeiten, ist bei verschiedenen Temperaturen etwas verschieden. Hierbei findet aber ein wesentlicher Unterschied zwischen Metallen und Flüssigkeiten statt. Bei Metallen nämlich wird die Leitungsfähigkeit bei höherer Temperatur schlechter, bei Flüssigkeiten wird sie besser. Metalle setzen also bei höherer Temperatur dem galvanischen Strom einen größeren Widerstand entgegen, Flüssigkeiten einen kleineren. Wie die Metalle verhält sich auch Quecksilber, welches ja ein Metall ist, wie die Flüssigkeiten dagegen Kohle. Der Widerstand der Kohle nimmt ab bei höherer Temperatur. Der Widerstand wächst bei den meisten reinen Metallen mit steigender Temperatur um nahezu gleich viel, nämlich für jeden Grad ungefähr um $^1/_3$ Proz., bei Eisen erheblich mehr und bei Quecksilber nur um etwa $^1/_{10}$ Proz. Die Metallegierungen aber verhalten sich anders. Patentnickel und Nickelin ändern ihren Widerstand viel weniger, wenn die Temperatur wächst, und die oben erwähnten Legierungen Mangankupfer und Manganin und Konstantan fast gar nicht. Für nicht zu große Temperaturänderungen haben diese immer denselben Widerstand. Gerade deswegen werden sie, wie wir bald sehen werden, für Normalwiderstände benutzt.

Fig. 64.



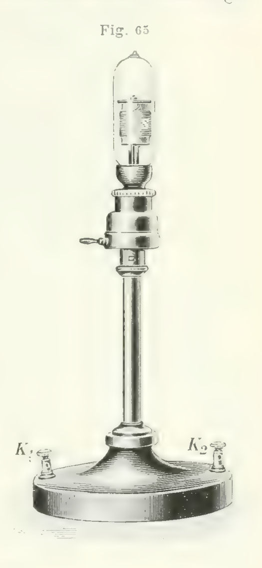
Bei den Leitern zweiter Klasse nimmt die Leitfähigkeit mit steigender Temperatur bedeutend zu. Zum Beispiel hat die oben erwähnte Schwefelsäure bei 0° die Leitfähigkeit 0,5184, bei 30° aber schon 0,8860. Auch bei festen Salzen findet eine sehr bedeutende Zunahme der Leitfähigkeit statt, wenn die Temperatur steigt. Bei niedrigen Temperaturen sind sie fast Nichtleiter, aber bei Temperaturen in der Nähe ihres Schmelzpunktes werden sie sehr gute Leiter.

Eine besondere Eigentümlichkeit zeigt die Leitungsfähigkeit des Selens. Dieselbe wird nämlich beträchtlich größer, wenn das Selen von Lichtstrahlen getroffen wird, als wenn es im Dunkeln ist. Selen ist ein kristallinischer Körper, und es scheint durch den Einfluß des Lichtes eine Modifikation der Kristalle derart einzutreten, daß eben die Leitfähigkeit erhöht wird. Man konstruiert für diese Wirkung Selenzellen, wie sie in zwei gebräuchlichen Formen durch Fig. 64 und 65 dargestellt sind. Fig. 64 zeigt bei S eine flache Selenzelle, Fig. 65 bei S eine zylindrische. In beiden Fällen wird das Selen in die Zwischenräume zwischen Messingdrähten eingebracht, welche entweder wie in Fig. 64 flach liegen, oder wie in Fig. 65 in vielen Windungen auf einem Zylinder angebracht sind. Das lichtempfindliche Selen wird durch Schmelzen bei ganz bestimmter Temperatur hergestellt. Die zylindrische Zelle ist in eine Glasbirne eingesetzt, aus der die Luft ausgepumpt ist. Zur bequemen Be-

nutzung wird die Birne in ein Stativ eingeschraubt, wie es die Figur zeigt. Die beiden Klemmschrauben K_1 und K_2 stehen mit den beiden Enden der Selenzelle in leitender Verbindung. Im Dunklen hat eine solche Zelle z. B. einen Widerstand von zirka 10 000 Ohm, bei Belichtung mit Sonnenlicht nur einen von etwa 1000 Ohm. Man kann aber auch Zellen herstellen, deren Widerstand bei Belichtung in noch größerem Verhältnis abnimmt, bis auf $^1/_{100}$ des Wertes im Dunkeln.

Wenn zwei Leiter aneinander grenzen und die Elektrizität zwischen ihnen übergehen soll, so muß die Verbindung beider Leiter eine sehr gute sein, weil sonst der Strom einen sehr großen Widerstand an der Trennungsstelle findet. Am besten lötet man daher die Metalle aneinander. Gewöhnlich aber klemmt man die Enden zweier Drähte durch Schrauben fest, damit sie vollkommen Kontakt haben. Bei der Kohle insbesondere ist es sehr auffällig, wie sehr eine schlechte Berührung zweier Kohlen den Widerstand derselben erhöht. Ein ganz geringer Druck auf die Berührungsstelle zweier Kohlen verringert den Widerstand beim Übergang der Elektrizität aus der einen zur anderen schon sehr bedeutend. In dem Mikrophon, das im zweiten Teil dieses Werkes besprochen ist, ist davon eine sehr wichtige Anwendung gemacht.

Fig. 65

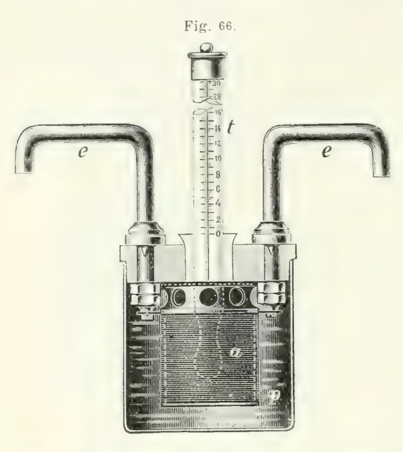


Um nun Widerstände von Drähten in Ohm messen zu können, muß man zunächst einen abgemessenen Widerstand haben, der gerade 1 Ohm (abgekürzt 1 Ω) beträgt, so wie man einen Metermaßstab haben muß, um Längen in Metern messen zu können. Das Ohm ist international gesetzlich bestimmt als der Widerstand einer Quecksilbersäule von 106,3 cm Länge und 1 qmm Querschnitt bei der Temperatur 0°. Man nennt dieses auch das internationale Ohm (int. Ω).

Normalwiderstände, welche genau 1 Ohm Widerstand haben, werden nach dem Modell der physikalischen Reichsanstalt in Berlin verfertigt. Ein solches Normalohm ist in Fig. 66 abgebildet. Die Normalwiderstände werden der Bequemlichkeit halber nicht direkt aus Quecksilbersäulen gemacht, sondern aus Drähten, deren Länge und Querschnitt so abgemessen ist, daß der ganze Draht genau denselben Widerstand hat wie eine Quecksilbersäule von 1,063 m Länge und 1 qmm Querschnitt. Und zwar werden die Drähte aus Manganin gewählt, weil dieses bei allen Temperaturen zwischen 0° und 100° fast genau denselben Widerstand hat. Ein Normalohm besteht aus einer zylindrischen Büchse, welche mit Petroleum p gefüllt ist und einen Ebonitdeckel trägt. Im Inneren der Büchse, im Petroleum, befindet sich ein hohler Zylinder a, auf welchen der abgemessene Draht aufgewickelt ist. Das Petroleum kann durch die Löcher auch im Inneren des Zylinders zirkulieren. Ein einge-

stecktes feines Thermometer t gibt die Temperatur im Inneren an. Die Enden des Drahtes sind durch Schrauben und Lötung an den beiden gebogenen Kupferstäben e e von 7 mm Stärke befestigt, welche aus dem Deckel heraustreten und deren freie Enden in Quecksilbernäpfe getaucht werden, durch welche ein Strom in sie geführt werden kann. Die äußere Ansicht eines solchen Normalohms (ohne Thermometer) zeigt Fig. 67.

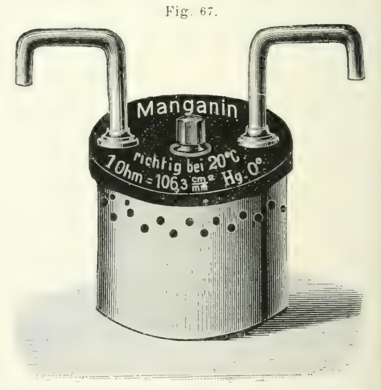
Fig. 66.



Es ist oft für elektrische Untersuchungen notwendig, eine Reihe von verschieden großen Widerständen zu haben, um sie in den Kreis eines Stromes einzuschalten, teils um dadurch den Strom auf eine gewünschte Stärke zu bringen, teils um unbekannte Widerstände mit bekannten vergleichen zu können. Es genügt dazu natürlich, wenn man eine Reihe von Drähten hat, deren Widerstände man genau kennt.

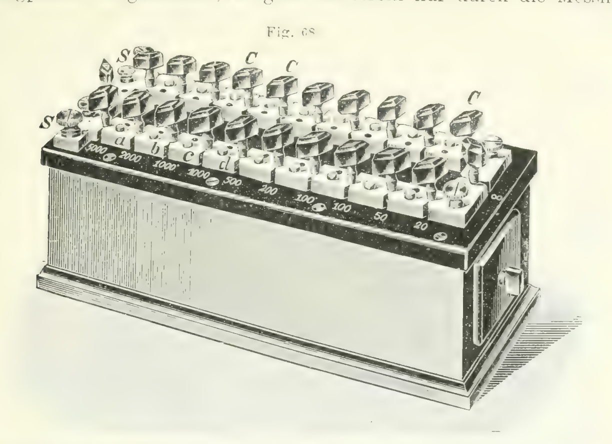
Zu diesem Zwecke hat zuerst Siemens eine Reihe von abgemessenen Widerständen in einem Kasten so angeordnet, daß sie einzeln oder zusammen leicht zu benutzen sind. Man nennt solche Apparate Widerstandskasten oder Stöpselrheostaten. Ein solcher ist in Fig. 68 in der äußeren Ansicht abgebildet. Auf dem Deckel des Kastens befindet sich eine Reihe von dicken Messingplatten a, b, c, d ..., deren Ränder wenig voneinander entfernt sind und die bogenförmige Ausschnitte haben, so daß die Stöpsel C C zwischen sie fest eingeklemmt werden können. Jede Messingplatte ist nun mit der folgenden durch eine, im Inneren des Kastens liegende Drahtrolle verbunden, wie man in der Durchschnittszeichnung Fig. 69 sieht, und zwar haben die Drahtrollen alle bestimmte, gemessene Widerstände. C C ... sind die Stöpsel, B B die Drahtrollen. Zwischen den aufeinander folgenden Messingplatten a a ... sind gewöhnlich Widerstände von 0,1, 0,2, 0,2, 0,5, 1, 2, 2, 5, 10, 20, 20, 50 u. s. w. Ohm vorhanden. Der Strom wird durch

Fig. 67.



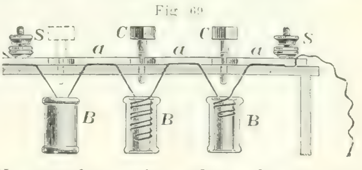
die Klemmschrauben S zu- und abgeführt. Sind alle Stöpsel zwischen den Messingplatten eingeklemmt, so geht der Strom nur durch die Messing-

Fig. 68.



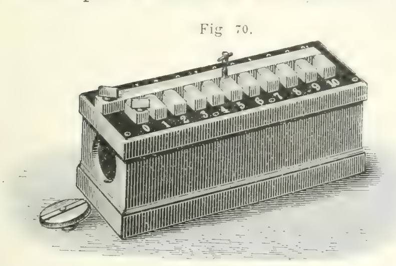
platten hindurch, weil der Widerstand der gesamten Drähte im Kasten ein enorm großer ist gegen den der dicken Messingplatten. Ist dagegen ein Stöpsel, etwa der punktiert gezeichnete, herausgenommen, so fließt der Strom durch die Rolle B an dieser Stelle und kommt dann erst zur anderen Klemmschraube S. Durch die Herausnahme des Stöpsels ist also der bestimmte Widerstand eingeschaltet. So kann man durch Herausnehmen eines oder mehrerer oder aller Stöpsel Widerstände von 0,1 Ohm an bis zu der Summe aller im Apparat vorhandenen einschalten.

Fig. 69.



Diese Widerstandskasten werden bis zu 10 000 Ohm Widerstand konstruiert.

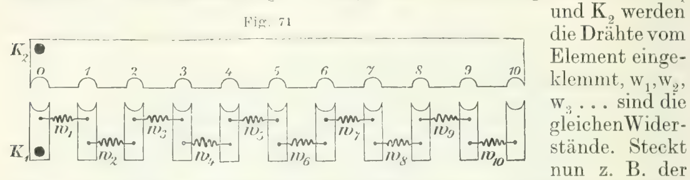
Fig. 70.



Für manche Zwecke werden diese Kasten so eingerichtet, daß in einem Kasten 10 gleiche Widerstände sich befinden (z. B. von je 1 Ohm oder von je 10 Ohm etc. bis zu je 100 000 Ohm). Diese nennt man deswegen Dekadenrheostaten. Sie besitzen, wie Fig. 70 zeigt, ebenfalls auf dem Deckel Messingklötze, deren je zwei benachbarte die beiden Enden eines der

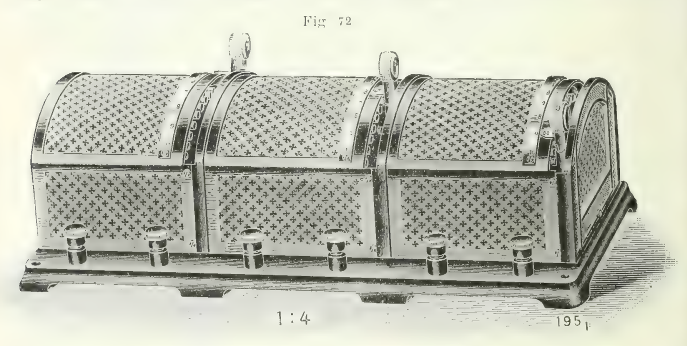
betreffenden Widerstände angelötet enthalten. Mit einem einzigen Stöpsel kann man dann die Widerstände vom 1- bis 10fachen der Einheit einschalten. Das Schema Fig. 71 zeigt die Verbindung an. Bei K_1 und K_2 werden die Drähte vom Element eingeklemmt, w_1, w_2, w_3 . . . sind die gleichen Widerstände. Steckt nun z. B. der Stöpsel im Loch 5 und ist die Einheit 10000 Ohm, so sind dabei 50000 Ohm in den Stromkreis eingeschaltet.

Fig. 71



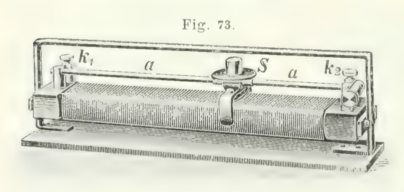
Solche Dekadenwiderstände ordnet man auch häufig jetzt kreisförmig oder halbkreisförmig an und verbindet mehrere derselben in

Fig 72



einem Kasten. Bei dieser Anordnung kann man, statt durch Stöpsel Kontakt zu machen, vielmehr durch einen beweglichen Metallarm, der gedreht wird, die Einschaltung der Widerstände besorgen. So zeigt Fig. 72 einen Dekadenrheostatkasten mit Kurbelschaltung von H a r t m a n n u. B r a u n in Frankfurt a. M. Dieser besteht aus 3 hintereinander verbundenen Abteilungen. In jeder sind 10 gleiche Widerstände im Halbkreise angeordnet, und zwar in der ersten links von je 1 Ohm, in der zweiten von je 10 Ohm, dann von je 100 Ohm. In jeder kann man durch die Kurbel einen bestimmten Widerstand einschalten, so daß man von 1 Ohm bis zu 1110 Ohm stetig um je 1 Ohm fortschreiten kann.

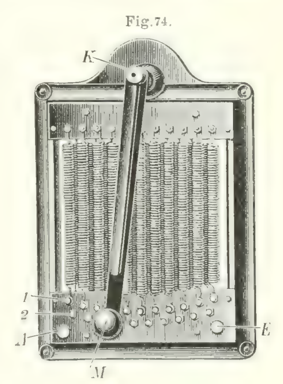
Fig. 73.



Die Widerstandskasten gestatten genau bestimmte und gemessene Widerstände in einen Stromkreis einzuschalten. Will man jedoch nur

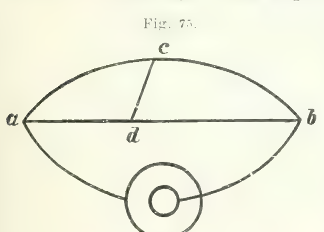
Widerstände rasch in einen Stromkreis einführen, ohne daß man ihre Größe genau zu kennen braucht (was häufig vorkommt, namentlich wenn man die Stromstärke in einem Stromkreis auf eine bestimmte Größe bringen will), so eignen sich dafür andere Apparate gut, die man als Ballastwiderstände bezeichnet. Viel benutzt werden jetzt die Schieberwiderstände (von Ruhstrat in Göttingen), von denen Fig. 73 eine Abbildung gibt. Bei diesen ist blanker Konstantandraht auf Schiefer aufgewickelt und ein fest anliegender Schieber S, der auf einer Metallstange a a gleitet, kann längs des Drahtes verschoben werden. Der Draht ist mit der Klemmschraube k_1, der Schieber durch die Stange mit der Klemmschraube k_2 verbunden. Schiebt man den Schieber von k_1 bis k_2, so wird immer mehr Draht in den Stromkreis eingeschaltet.

Fig. 74.



Vielfach werden für starke Ströme (Ströme von mehreren Ampere) die Ballastwiderstände in der Form angewendet, die in Fig. 74 gezeichnet ist. Eine Reihe von Spiralen aus Konstantandraht sind in einem Rahmen befestigt. Das Ende der ersten Spirale geht in einen Kontaktknopf 1, der Anfang der zweiten Spirale in einen Knopf 2 aus und so fort. Alle diese sind metallisch verbunden. Auf diesen Knöpfen läßt sich eine starke Messingfeder durch die Kurbel M verschieben. Der eine Pol der Leitung ist mit der vom Gehäuse isolierten Klemme A und durch diese mit dem Drehpunkt K der Kurbel, also mit der Schleiffeder der Kurbel M, der andere Pol der Leitung ist mit der Klemme E verbunden. Bei jeder Stellung der Feder ist nun, wie man aus der Verbindung in der Figur erkennt, ein anderer Widerstand in den Stromkreis eingeführt. Wird die Kurbel auf den Anfangsknopf 1 gestellt, so sind alle Widerstände eingeschaltet, bei allmählichem Hineinschieben der Kurbel nach E zu sind immer weniger Widerstände in dem Stromkreis.

Fig. 75.



Nachdem wir uns so mit einigen Apparaten vertraut gemacht haben, können wir nun leicht experimentell den Widerstand eines jeden beliebigen Leiters messen und in Ohm ausdrücken. Man hat dazu verschiedene Methoden. Unter allen aber ist die bequemste, und daher auch am meisten angewendete, diejenige, welche man die Methode der Wheatstoneschen Brücke nennt. Sie beruht auf der Anwendung derjenigen Stromverzweigung, die wir früher betrachtet haben.

Wir haben oben S. 74 gesehen, daß, wenn wir von einem Element

aus den Strom durch eine Leitung mit zwei Zweigen schicken, die wiederum miteinander durch einen Draht, durch eine Brücke, verbunden sind, daß dann unter gewissen Umständen der Strom in der Brücke gleich Null wird. Diese Umstände treten, wie wir sahen, dann ein, wenn in Fig. 75

$$\frac{\text{Widerstand von a c}}{\text{Widerstand von c b}} = \frac{\text{Widerstand von a d}}{\text{Widerstand von d b}}$$

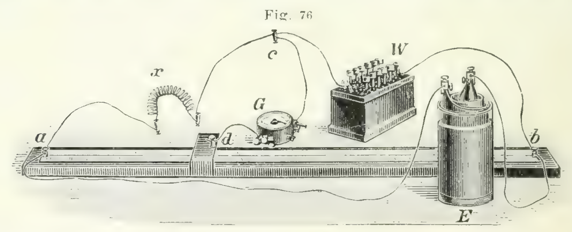
ist. Dann ist der Strom in dem Brückendraht immer gleich Null, wie groß auch der Widerstand des Brückendrahtes c d sein mag. Man kann deshalb in die Brücke auch ein Galvanoskop einschalten und durch dieses zugleich erkennen, wenn der Strom in der Brücke verschwindet.

Will man nun den Widerstand eines Drahtes bestimmen, so bringt man ihn z. B. an die Stelle des Zweiges a c. Als Zweige a d und b d nimmt man einen gleichmäßig dicken Draht, auf dem ein beweglicher Kontakt d verschoben werden kann. Dieser Kontakt wird am besten aus einem Stahlklotz gebildet, der eine scharfe Kante besitzt und mit dieser auf dem Draht aufliegt. Der Draht selbst liegt auf einer Skala, so daß man die Länge von a d und b d ablesen kann. Endlich als Zweig c b nimmt man einen bekannten Widerstand, z. B. 1 Ohm. Und nun verbindet man a und b mit einem Element und verschiebt den Kontaktschlitten auf dem Draht a d b so lange, bis das Galvanoskop in c d nicht mehr abgelenkt ist. Dann geht kein Strom durch c d, und nun wissen wir, daß

$$\frac{\text{Widerstand des zu untersuchenden Drahtes}}{\text{1 Ohm}} = \frac{\text{Länge a d}}{\text{Länge d b}},$$

also der Widerstand des zu untersuchenden Drahtes = 1 Ohm $\times$ dem Verhältnis der Längen von a d und b d ist. Folglich haben wir den Wider-

Fig. 76



stand des zu untersuchenden Drahtes in Ohm bestimmt. Die Verbindungen bei dieser Widerstandsmessung gehen deutlich aus Fig. 76 hervor. Darin ist x der zu untersuchende Widerstand, W ein Widerstandskasten, aus dem ein bekannter Widerstand entnommen ist (in unserem Beispiel 1 Ohm). Zwischen a und b ist ein Konstantandraht über einer Skala ausgespannt. Bei d ist der verschiebbare Kontakt. E ist das Element und G das Galvanoskop.

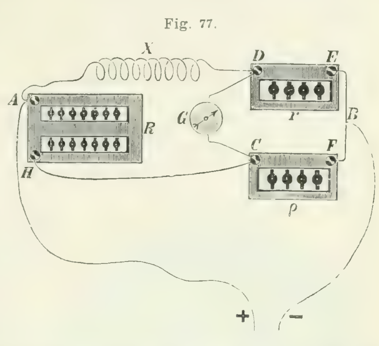
Diese Methode nennt man, wie schon erwähnt, die Methode der Wheatstoneschen Brücke.

Die nötigen Verbindungsdrähte von x und W miteinander und mit den Klemmen a und b müssen entweder so geringen Widerstand haben,

daß man ihn vernachlässigen kann, oder ihr Widerstand muß bekannt sein. Auf die übrigen Verbindungsdrähte kommt es nicht an.

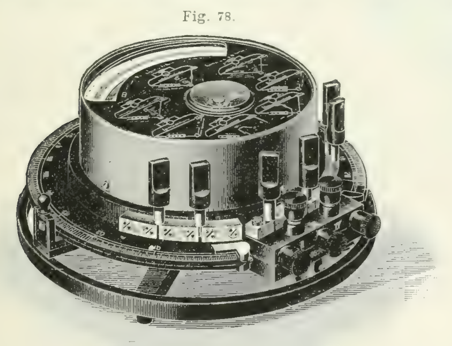
Bei dieser Methode ist es zunächst gleichgültig, wie groß der bekannte Widerstand W ist, mit dem der unbekannte x verglichen wird. Das Verhältnis der Drahtlängen a d und d b ist immer gleich dem Verhältnis der Widerstände x und W, wenn das Galvanoskop keinen Ausschlag zeigt. Tatsächlich aber liefert die Methode um so genauere Werte, je weniger verschieden die beiden Widerstände x und W sind. Hat man also einen Stöpselrheostaten zur Verfügung, so wird man erst eine provisorische Messung machen, um einen ungefähren Wert von x zu erhalten, und dann eine genaue Messung, indem man als bekannten Widerstand von W einen dem provisorisch bestimmten von x möglichst gleichen benutzt.

Fig. 77.



Man verwendet die Wheatstonesche Kombination noch auf andere Art zum Messen von Widerständen, wie das Schema in Fig. 77 zeigt. Vom Element geht der Strom nach den beiden Klemmen A und B und teilt sich hier, so daß er einmal durch den zu untersuchenden Widerstand x und einen kleinen Widerstandskasten r, andererseits durch einen großen Rheostaten R und einen anderen kleinen Widerstandskasten ρ geht. Zwischen C und D befindet sich die Brücke mit dem Galvanoskop G. Man schaltet z. B. bei r und ρ je 1 Ohm aus, so daß das Verhältnis der Widerstände B D und B C gleich 1 ist. und zieht aus R dann so lange Stöpsel heraus, bis in G kein Strom sich zeigt. Dann muß der aus R gezogene Widerstand gleich dem gesuchten sein. Macht man das Verhältnis der Widerstände B D und B C nicht gleich 1, sondern z. B. gleich 0,1, 0,01 oder gleich 10, 100, so ist auch der zu bestimmende Widerstand gleich 0,1-, 0,01- oder gleich 10-, 100mal dem ausgeschalteten Rheostatenwiderstand.

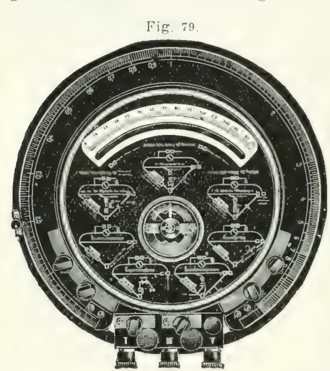
Fig. 78.



Da Widerstandsmessungen in den wissenschaftlichen und praktischen Anwendungen des elektrischen Stromes am häufigsten vorkommen, so hat man die dazu notwendigen Apparate möglichst handlich zusammenzubringen gesucht. Direkt für die Kombination der Wheatstoneschen Brücke ist das Siemenssche Universalgalvanometer eingerichtet, von dem in Fig. 78 die äußere Ansicht abgebildet ist und in das wir genauere Einsicht nehmen wollen.

Das Instrument enthält zunächst ein Milliamperemeter, wie das in Fig. 60 abgebildete. Dasselbe sitzt auf einer Schieferplatte und ist mit einem Deckel versehen, auf dem die verschiedenen Schaltungsweisen des Instrumentes gezeichnet sind, und der einen Ausschnitt für die Skala des Milliamperemeters besitzt. Die Schieferplatte ist in Fig. 79 besonders gezeichnet, in welcher das ganze Instrument von oben gesehen abgebildet ist. Unterhalb der Schieferplatte befinden sich vier Widerstandsrollen von 1, 9, 90, 900 Ohm, die in bekannter Weise durch Stöpsel ein- und ausgeschaltet werden können, so daß man, indem man sie der Reihe nach herausnimmt, 1, 10, 100, 1000 Ohm eingeschaltet hat. In dem Rand der Schieferplatte befindet sich eine Nut und in diese ist ein Neusilberdraht von gleichförmigem Widerstand eingelegt, der als Meßdraht bei der Wheatstoneschen Brücke dient. Auf der Schieferplatte befindet sich eine Teilung, und zwar ist diese derartig eingerichtet, daß man immer direkt das Längenverhältnis der beiden ungleichen Teile des Drahtes, von links an gemessen, ablesen kann. In der Mitte gibt die Zahl 1 an, daß beide Hälften gleiche Längen haben, links sind die Zahlen kleiner als 1, rechts größer als 1. Man kann also das Verhältnis der Längen der beiden Abschnitte des Meßdrahtes direkt ablesen.

Fig. 79.



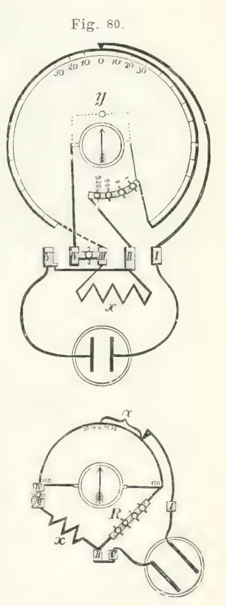
Aus der Schieferplatte ragen weiter fünf Klemmschrauben I, II, III, IV, V vorn hervor, von denen II und IV senkrecht stehen, während I, III, V horizontal herausstehen. III und IV können durch einen Stöpsel miteinander verbunden werden, während V mit II durch einen Druck auf eine Feder momentan in Verbindung gesetzt werden kann.

Endlich sitzt auf der Achse des Apparates drehbar ein Arm (den man deutlich in Fig. 78 an der Stelle 0,3 der Teilung sieht). Dieser trägt einen metallischen Kontakt, der den Meßdraht berührt und auf ihm verschoben werden kann.

Die Verbindung der einzelnen Teile des Apparates und zugleich seine Einrichtung zur Wheatstoneschen Brücke ist nun aus Fig. 80 zu ersehen. Die beiden Pole des Elementes werden zwischen I und V eingeschaltet, der zu untersuchende Widerstand x zwischen II und III (mit welchem IV durch einen Stöpsel verbunden ist). Der Meßdraht steht einerseits in ständiger Verbindung mit den Widerständen 1, 9,

90, 900, und durch diese mit der Klemme II, andererseits mit der Klemme III, das Galvanometer ebenfalls mit den Widerständen und der Klemme IV. Der bewegliche Zeiger ist mit der Klemme I fest verbunden. In das Schema der Wheatstoneschen Brücke gebracht, reihen sich die einzelnen Zahlen und Buchstaben dieser Figur nun so ein, wie es die untere Figur angibt. Dies ist aber die Anordnung der Brücke, welche wir auf S. 72 u. f. beschrieben und begründet haben. Man schaltet nun beim Gebrauch des Instrumentes denjenigen von den Widerständen 1 bis 1000 ein, der dem zu bestimmenden Widerstand x am nächsten liegt (was man durch einen Vorversuch ermittelt), und verschiebt den Kontaktarm so lange, bis der Galvanometerzeiger auf Null bleibt. Dann steht der zu bestimmende Widerstand zu dem bekannten (durch die Stöpsel ausgeschalteten) in demselben Verhältnis wie die Längen der beiden Teile des Meßdrahtes, die man direkt auf der Skala der Schieferplatte abliest. Man hat daher den zu bestimmenden Widerstand sofort in Ohm ausgedrückt.

Fig. 80.

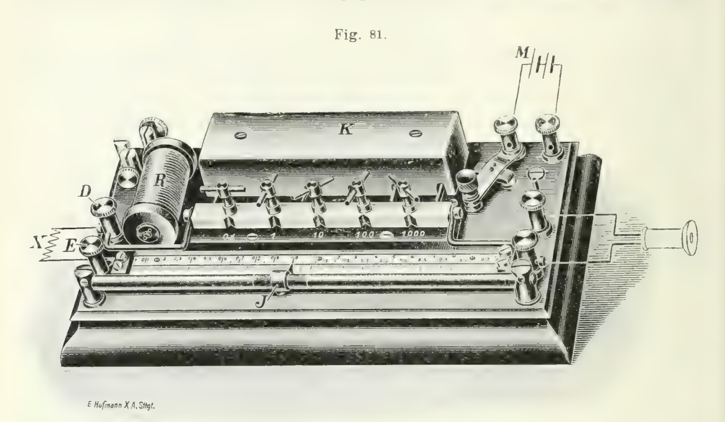


In Bezug auf die Schnelligkeit und Bequemlichkeit der Widerstandsbestimmung läßt das Universalgalvanoskop nichts zu wünschen übrig.

Auf diese Weise läßt sich der Widerstand jedes Leiters messen. Ohne weiteres anwendbar ist die Methode der Wheatstoneschen Brücke in der angegebenen Art bei metallischen Leitern und bei anderen Leitern erster Klasse. Bei der Bestimmung des Widerstandes von Flüssigkeiten kommt aber noch eine Komplikation hinzu, so daß bei ihnen die Methode noch etwas abgeändert werden muß. Eine Flüssigkeit nämlich wird, wie wir in Kap. 6 sehen werden, durch einen galvanischen Strom zersetzt und wirkt dann selbst wie ein galvanisches Element. Man kann das aber verhindern, indem man durch die Flüssigkeit rasch hintereinander Ströme von entgegengesetzter Richtung, sogenannte Wechselströme, sendet. Macht man dann die zu untersuchende Flüssigkeit zu der einen Seite eines Wheatstoneschen Vierecks, so kann man durch Abgleichen der Widerstände auch hierbei die Wechselströme in der Brücke verschwinden machen und dadurch den Widerstand der Flüssigkeit messen. Derartige Wechselströme liefert z. B. ein sogenannter Induktionsapparat, wie wir ihn in Kap. 9 beschreiben werden. Nur ist noch die Schwierigkeit vorhanden, daß ein Galvanoskop in der Brücke durch solche Wechselströme gar nicht beeinflußt wird. Der erste Strom will z. B. die Nadel nach rechts ablenken, der zweite, gleich starke, aber entgegengesetzte Strom, sucht sie nach links abzulenken. Die Nadel bleibt daher, wie Buridans Esel, in Ruhe. Es gibt aber Apparate, die auch durch Wechselströme in gleicher Weise beeinflußt werden wie die Galvanoskope durch gleichgerichtete Ströme, nämlich ins-

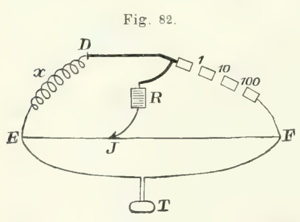
besondere die Telephone, die wir in Kap. 9 beschreiben werden. Bringt man also z. B. ein Telephon in die Brücke und sendet man Wechselströme durch die ganze Kombination von Leitern, so wird man dieses so lange tönen hören, bis die Widerstände so abgeglichen sind, daß durch die Brücke

Fig. 81.



keine Ströme gehen. Dann bleibt das Telephon ruhig, und dann bestimmt sich der Flüssigkeitswiderstand wie ein Drahtwiderstand. Diese Meßmethode ist von F. Kohlrausch ausgearbeitet worden. Man bedient sich vorteilhaft, um die Widerstände von Flüssigkeiten zu messen, einer Anordnung, wie sie von F. Kohlrausch angegeben und von Hartmann & Braun in Frankfurt a. M. unter dem Namen „Universalmeßbrücke" ausgeführt wird. Dieselbe ist in Fig. 81 gezeichnet. Man sieht eine kleine Drahtrolle R links in der Figur; diese ist der Induktionsapparat, der die Wechselströme erzeugt. Er erhält einen Strom von einem Element M, das rechts schematisch gezeichnet ist. In dem Kästchen K befinden sich fünf Widerstände von 0,1, 1, 10, 100, 1000 Ohm, welche durch Herausnehmen der vor dem Kästchen befindlichen Stöpsel eingeschaltet werden können. Auf der geteilten Skala liegt ein Platindraht, auf welchem ein Metallzeiger J verschoben werden kann, der sich auf einem Messingstab bewegt. Der zu messende Widerstand X wird an die Klemmen D und E links, das Telephon rechts angelegt. Man verschiebt den Zeiger auf dem Meßdraht so lange, bis der Ton im Telephon verschwindet, und bestimmt dadurch auf bekannte Weise den Widerstand der Flüssigkeit ganz so, wie man es bei einem festen Leiter tut. In das Schema der Wheatstoneschen Brücke gebracht, reihen sich

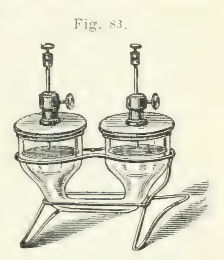
Fig. 82.



die einzelnen Teile des Apparates so aneinander, wie es Fig. 82 zeigt. T ist das Telephon, R der Induktionsapparat.

Will man Flüssigkeiten auf ihre Leitungsfähigkeit untersuchen, so füllt man sie in Gefäße, etwa von der Form der in Fig. 83 gezeichneten. Durch die Ebonitdeckel dieser Gefäße gehen Messingstäbchen hindurch, welche unten Platinscheibchen tragen, durch welche der Strom in die Flüssigkeit geleitet wird. Diese Scheiben (die für genaue Messungen noch platiniert, mit einem Überzug von fein verteiltem Platin versehen werden müssen) mit ihren Stielen nennt man die Elektroden. Oben befinden sich die Klemmschrauben zur Verbindung. Bequemer sind noch die Gefäße von der Form 84, einfache Fläschchen, in denen zwei halbzylindrische Elektroden aus Platin stehen, die mit Platindrähten versehen sind. Letztere gehen eingeschmolzen durch das Glas hindurch. Man füllt ein solches Gefäß zunächst mit einer der Lösungen, deren Leitfähigkeit auf S. 83 angegeben ist, und bestimmt den Widerstand derselben, dann füllt man es mit der zu untersuchenden Lösung und bestimmt wieder den Widerstand. Die Leitfähigkeit der zu untersuchenden Lösung verhält sich dann zu der der bekannten Lösung umgekehrt wie die Widerstände derselben. Noch einfacher sind Gefäße von der Form Fig. 85, sogenannte Tauchelektroden. Diese werden in die zu untersuchende Flüssigkeit (die etwa in einer Flasche sich befindet) eingetaucht, so daß die Flüssigkeit durch das unten sichtbare Loch eindringt und die Elektroden umgibt.

Fig. 83.



Ein spezieller Fall von flüssigen Widerständen ist der innere Widerstand der galvanischen Elemente selbst. Es ist eine zuweilen notwendige Aufgabe, diesen inneren Widerstand zu bestimmen. Am einfachsten und raschesten kann man ihn, ebenso wie den jeder Flüssigkeit, durch die Wheatstonesche Brücke mit Wechselströmen und Telephon bestimmen. Man braucht eben nur in Fig. 81 bei X das zu untersuchende Element einzuschalten.

Fig. 85.

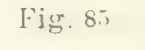
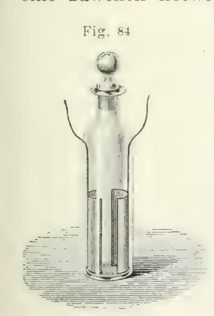


Fig. 84

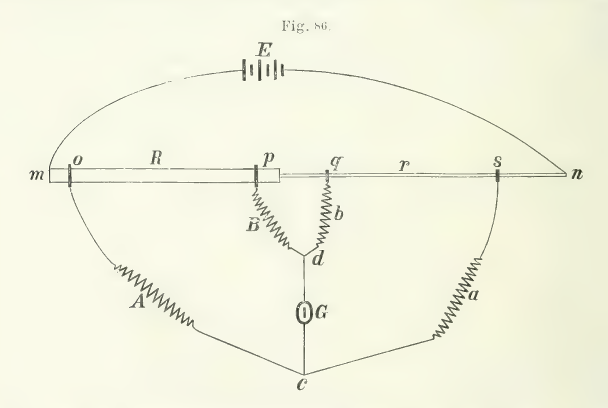


Natürlich hängt der innere Widerstand eines galvanischen Elements von der Größe des Elements, von der Beschaffenheit der Tonzellen u. s. w. ab. Man kann deshalb für die gewöhnlich benutzten Elemente auch nur ungefähre Angaben über den inneren Widerstand machen. Ein Bunsensches Element von der Größe, wie sie gewöhnlich gebraucht wird (32 cm Höhe), hat nur etwa 0,2 Ohm Widerstand, ein gewöhnlicher Daniell etwa 0,6 Ohm, ein Kupferelement der deutschen Telegraphenverwaltung 7,5 Ohm, ein Leclanché-Element ungefähr 0,3 Ohm, das S. & H.-Beutelelement nur 0,06 Ohm, und ein Trockenelement T von Siemens & Halske je nach der Größe 0,1 bis 0,3 Ohm Widerstand.

Aus diesen Zahlen und aus den Werten der elektromotorischen Kraft dieser Elemente, die früher angegeben wurden. kann man die Stromstärke bei der Kurzschließung der Elemente (S. 68) berechnen. Sie wäre für ein Bunsen-Element etwa $\frac{1,9}{0,2} \frac{\text{Volt}}{\text{Ohm}} = 9,5$ Ampere, für einen Daniell 2 Ampere, ein Kupferelement 0,15 Ampere, ein Leclanché-Element 5 Ampere, ein S. & H.-Beutelelement über 20 Ampere, ein T-Trockenelement 15 Ampere. Doch werden alle Elemente durch so starke Ströme rasch ruiniert, so daß diese Zahlen nicht wirklich zu entnehmende, sondern nur maximale Stromstärken bedeuten.

Eine besondere Modifikation erfordert die Methode der Wheatstoneschen Brücke, wenn es sich darum handelt, sehr kleine Widerstände (z. B. von 0,01 Ohm oder gar 0,00001 Ohm) zu messen. Da kann man die gewöhnliche Schaltung nicht anwenden, erstens weil genaue Vergleichswiderstände von diesem geringen Betrage schwer herzustellen und sehr kostspielig sind, hauptsächlich aber, weil die Verbindungen von Drähten untereinander durch Klemmschrauben selbst schon Widerstände von diesem Betrag besitzen können. Und solche Messungen sind allmählich immer wichtiger geworden, da man in elektrischen Anlagen es oft mit sehr kleinen Widerständen zu tun hat, in denen sehr große Stromstärken enthalten sind. Deswegen hat Sir W. Thomson (Lord Kelvin) eine eigene Methode dafür angegeben, welche nach ihm die Methode der Thomsonbrücke oder Doppelbrücke heißt. Das Prinzip derselben ist aus der schematischen Fig. 86 ersichtlich. Der zu messende Wider-

Fig. 86.



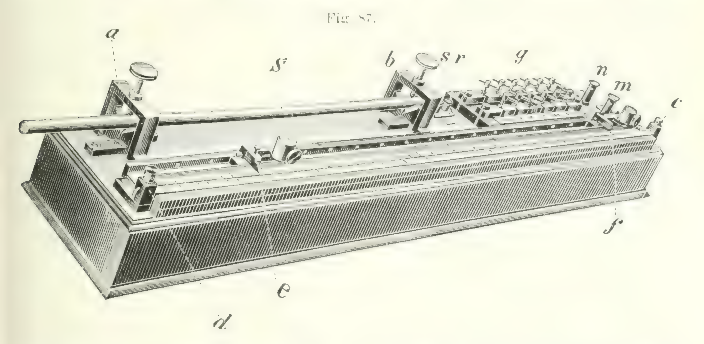
stand R und ein ausgespannter dicker Draht r, ein Meßdraht, werden hintereinander geschaltet. Von zwei festen Stellen des zu messenden Widerstandes R, nämlich von o und p, werden zwei gleiche Widerstände A und B (etwa je 10 Ohm) zu zwei Punkten c und d hingeführt, und ebenso werden von zwei Stellen des Meßdrahtes, nämlich q und s, durch verschiebbare Kontakte zwei einander gleiche Widerstände a und b, etwa je 1000 Ohm, zu denselben Punkten hingeführt. Zwischen c und d wird

ein Galvanoskop G eingeschaltet, zwischen m und n eine (starke) Batterie E, etwa von 8 Volt Spannung. Das Galvanoskop zeigt natürlich einen Ausschlag. Man verschiebt nun den einen der Kontakte, etwa s, während man den anderen, q, fest liegen läßt, so lange, bis der Ausschlag des Galvanoskops verschwindet. Ist das erreicht, dann läßt sich zeigen, daß

$$\frac{\text{Widerstand von R}}{\text{Widerstand von r}} = \frac{\text{Widerstand von A}}{\text{Widerstand von a}}$$

ist. Der Widerstand von R ist dann also in unserem Beispiel nur ein Hundertstel des Widerstandes von r. Ist nun r ein ausgespannter dicker Draht, der in 1000 mm geteilt ist, und hat der ganze Draht, wie man es in der Praxis macht, den Widerstand von 0,01 Ohm, so hat also jeder Millimeter des Drahtes den Widerstand von $\frac{1}{100\,000}$ Ohm, und der gesuchte Widerstand von R ist dann gleich der Zahl der Millimeter zwischen q und s,

Fig. 87.



dividiert durch 10 Millionen. Damit kann man also sehr kleine Widerstände messen.

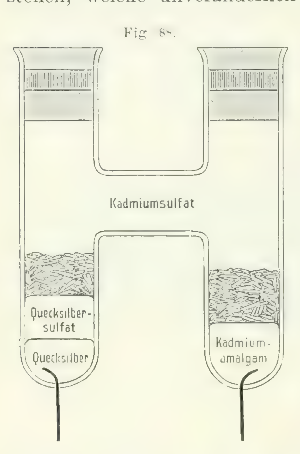
Bei der praktischen Anordnung dieser Messungen kann man sich der in Fig. 87 abgebildeten Thomsonbrücke von Edelmann bedienen. Man sieht bei dieser den ausgespannten Draht c d von 0,01 Ohm Widerstand mit den beiden verschiebbaren Kontakten f und e, ferner sieht man als zu untersuchenden Widerstand eine dicke Kupferstange S, die bei a und b mit festen Schrauben eingeklemmt ist. Bei g sind 4 Widerstandssätze von je 10, 100 und 1000 Ohm angebracht, aus denen man die Widerstände A, B und a, b der vorigen Figur bildet. Nimmt man für a, b die Widerstände von je 1000 Ohm und für A, B entweder je 10 oder 100 oder 1000 Ohm, so hat man ein Verhältnis von 0,01 oder 0,1 oder 1. Zwischen m und n wird die Batterie, zwischen s und r das Galvanometer eingeschaltet.

Nach einer der auf den letzten Seiten erörterten Methoden kann man also von jedem Draht, von jeder Flüssigkeitssäule den Widerstand in Ohm messen.

Die zweite Größe, welche bei jedem Strom in Betracht kommt, ist die elektromotorische Kraft. Als Einheit für dieselbe

haben wir 1 Volt genommen. Die elektromotorische Kraft eines Bunsenschen Elementes ist ungefähr 1,9 Volt, die eines Leclanché-Elementes gleich 1,5 Volt. Eine Kette von zehn hintereinander verbundenen Bunsenschen Elementen hat also eine elektromotorische Kraft von 19 Volt. Die elektromotorische Kraft der meisten Elemente ist aber durchaus keine konstante Größe, sondern ändert sich, wenn das Element Strom abgibt. Und selbst bei dem konstantesten dieser gebräuchlichen Elemente, dem Daniell, hängt die Größe der elektromotorischen Kraft wesentlich von der nicht immer gleich zu machenden Reinheit der benutzten Substanzen ab. Man hat sich deshalb bemüht, Elemente herzustellen, welche unveränderlich immer dieselbe elektromotorische Kraft besitzen, die man dann nur ein für allemal in Volt zu bestimmen hat. Solche Elemente nennt man Normalelemente. Es sind zwei solche Elemente in Gebrauch, das Clark-Element und das Weston-Element. Das letztere kann man sich leicht selbst in folgender Weise herstellen. In ein H-förmiges Reagenzglas (Fig. 88) bringt man auf den Boden des einen Schenkels eine Schicht reinen Quecksilbers, über diese einen Teig, der durch Zusammenreiben von Quecksilbersulfat mit Kristallen von schwefelsaurem Kadmium und Quecksilber gebildet ist. In den anderen Schenkel wird Kadmiumamalgam gefüllt, welches aus 90 Teilen Quecksilber und 10 Teilen Kadmium besteht. Da das Amalgam bei gewöhnlicher Temperatur fest ist, wird es heiß eingefüllt und erstarren gelassen.

Fig. 88.

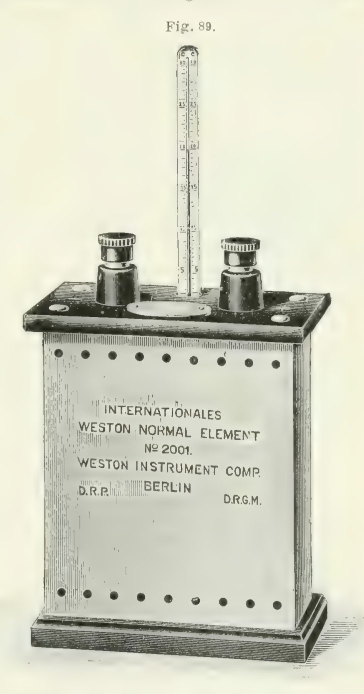


Über die Paste in dem einen Schenkel und über das Amalgam in dem anderen Schenkel werden Kristalle von schwefelsaurem Kadmium geschüttet und das Ganze in beiden Schenkeln mit konzentrierter Kadmiumsulfatlösung übergossen. Die Gläser werden in der Weise verschlossen, daß auf die Kadmiumsulfatlösung heißes Paraffin gegossen wird, darauf ein Kork in jeden Schenkel eingesetzt und die Mündung mit Marineleim ausgegossen wird. In die Gläser ist unten je ein Platindraht eingeschmolzen, welche zur Zuleitung dienen. Die elektromotorische Kraft dieses Elementes ist 1,0183 Volt bei 20° und ändert sich nur in der vierten Stelle bei allen Temperaturen zwischen 10 und 20°. Das Clark-Element unterscheidet sich nur dadurch von dem Weston-Element, daß statt Kadmium und Kadmiumsulfat vielmehr Zink und Zinksulfat angewendet ist. Seine elektromotorische Kraft ist aber ziemlich erheblich von der Temperatur abhängig, sie beträgt bei 15° 1,438 Volt, bei 20° 1,433 Volt. Gerade deswegen wird jetzt das Weston-Element dem Clark-Element vorgezogen, aus demselben Grunde, wie für Normalwiderstände Manganindrähte viel geeigneter sind als Kupferdrähte. Die Normalelemente werden von der Physikalisch-technischen Reichs-

anstalt geprüft und es wird der genaue Wert ihrer elektromotorischen Kraft bei verschiedenen Temperaturen bestimmt. Eine Ansicht des Weston-Elements, wie es von der Weston Instrument Co. in Berlin hergestellt wird, zeigt Fig. 89.

Um nun die elektromotorische Kraft irgend eines Elementes mit der eines Weston- oder Clark-Elementes zu vergleichen, hat man verschiedene Methoden. Da die elektromotorische Kraft eines Elementes gleich der Spannungsdifferenz seiner Pole im ungeschlossenen Zustand (also ohne Strom) ist, so kann man sie dadurch bestimmen, daß man an dem Quadrantelektrometer erst den Ausschlag, den ein Westonelement gibt, dann den Ausschlag des zu bestimmenden Elementes mißt. Das Verhältnis dieser Ausschläge ist gleich dem Verhältnis der elektromotorischen Kräfte. Man kann so die gesuchte elektromotorische Kraft sofort in Volt ausdrücken, da man die elektromotorische Kraft eines Westonelementes in Volt kennt.

Fig. 89.

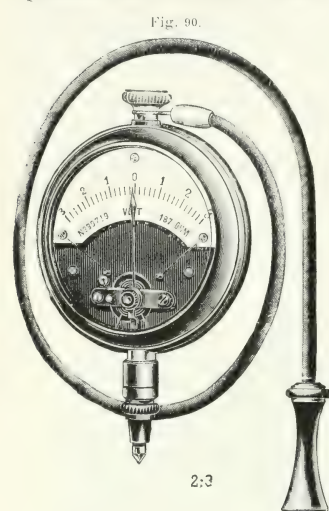


Praktisch wird die elektromotorische Kraft eines Elementes am einfachsten bestimmt, wenn man ein geeichtes Galvanometer, also etwa ein Milliamperemeter benutzt, das einen großen bekannten Widerstand besitzt, von z. B. 100 oder 200 Ohm oder dem ein solcher großer Widerstand vorgeschaltet ist. Denn gegen diesen großen Widerstand ist der innere Widerstand des Elements zu vernachlässigen und aus dem Ohmschen Gesetz folgt dann, daß die gesuchte elektromotorische Kraft gleich der gemessenen Stromstärke multipliziert mit dem Widerstand des Amperemeters ist. Kennt man die Ausschläge des Instruments in Ampere und seinen Widerstand in Ohm, so kennt man die elektromotorische Kraft des gemessenen Elements in Volt, da die Zahl der Volt gleich dem Produkt aus den Ampere und den Ohm ist. Da bei gegebenem Widerstand des Instruments jeder Teilstrich der Skala einer bestimmten Anzahl Volt entspricht, so teilt man die Skala gleich in Volt ein und nennt derartige Instrumente Voltmeter.

Eine bequeme Form eines solchen Voltmeters zur Bestimmung der elektromotorischen Kraft einzelner Elemente (wie sie z. B. bei den elek-

trischen Automobilen praktisch oft vorgenommen werden muß) zeigt Fig. 90. Das Voltmeter hat die Form einer Taschenuhr. Die untere Spitze wird an den einen Pol des zu untersuchenden Elementes angedrückt, die Spitze der Drahtschnur an den anderen Pol. Das Instrument mißt elektromotorische Kräfte bis zu 3 Volt.

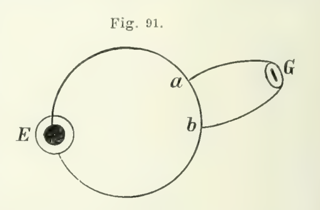
Fig. 90.



Durch dieselbe Methode wird aber zugleich auch leicht eine allgemeinere Größe bestimmt, nämlich der *Spannungsunterschied* an zwei Punkten eines geschlossenen Stromkreises. Ein spezieller Fall davon ist die Messung des Spannungsunterschiedes an den Polen einer Batterie, während der Stromkreis geschlossen ist, der sogenannten *Klemmenspannung* (S. 70).

Man kann nun solche Spannungsunterschiede auch leicht und direkt in Volt messen, wenn man eben ein Voltmeter hat, also ein Galvanometer, dessen Widerstand groß ist und den man kennt. Das einfache Mittel zur Messung von Spannungsunterschieden besteht dann darin, daß man das Galvanometer *nicht direkt* in den Stromkreis einschaltet, sondern *parallel* zu ihm. Es sei z. B. in Fig. 91 E a b ein Stromkreis, in dem ein Strom vom Element E aus fließt, und man wolle den Spannungsunterschied an irgend zwei Punkten a und b des Stromkreises bestimmen. Man verbindet dann, parallel zu dem Drahtstück a b, das Galvanometer G mit den beiden Punkten a und b. Man sagt dann, *das Galvanometer liegt im Nebenschluß* zu a b. Wir wissen nun (S. 71), daß der Strom im Galvanometer G gleich dem Spannungsunterschied von a und b dividiert durch den Widerstand der Zweigleitung ist. Der Widerstand der Zweigleitung ist aber, bis auf die notwendigen Verbindungsdrähte, einfach der des Galvanometers. Legt man also das Galvanometer an irgend welche zwei Punkte des Stromkreises, wie a und b an, so geben, da ja der Widerstand des Galvanometers derselbe bleibt, die Ausschläge direkt ein *Maß für die Spannungsdifferenz* an diesen beiden Punkten. Kennt man nun die Ausschläge, welche das Galvanometer für 1, 2, 3 etc. Ampere gibt, und kennt man den Widerstand des Galvanometers in Ohm, so kann man bei jedem Ausschlag angeben, wie groß der Spannungsunterschied in Volt ist, durch die er hervorgerufen ist.

Fig. 91.



Natürlich wird im allgemeinen durch die Anlegung eines solchen Amperemeters im Nebenschluß zu a b die Stromstärke und die Spannungsverteilung geändert. Wenn aber der Widerstand im Galvanometerkreis groß ist, so ist der abgezweigte Strom, der durch dasselbe hindurchfließt, gering und daher ist auch die Störung gering. Man nimmt deswegen für solche Galvanometer, die im Nebenschluß gebraucht werden, um Spannungsunterschiede zu messen, also für Voltmeter, am besten solche von großem Widerstand, etwa 100 Ohm oder aber man schaltet vor das Galvanometer, wenn es kleinen Widerstand hat, noch einen bekannten passend großen Widerstand vor. So hat z. B. das Milliamperemeter, das oben S. 78 abgebildet ist, einen Widerstand von 1 Ohm. Da jeder Grad der Teilung desselben einer Stromstärke von 0,001 Ampere (1 Milliampere) entspricht, so gibt das Instrument, wenn es im Nebenschluß an zwei Punkte des Stromkreises angelegt wird, pro Teilstrich eine elektromotorische Kraft von

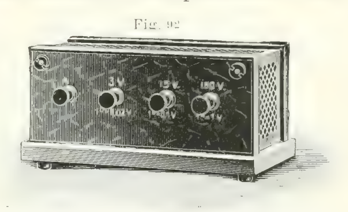
$$0{,}001 \text{ Ampere} \times 1 \text{ Ohm} = 0{,}001 \text{ Volt},$$

also einem Millivolt an.

Da der Zeiger im ganzen nur 150 Teilstriche Ausschlag machen kann, so kann das Instrument offenbar nur Spannungen zwischen 0,001 und 0,15 Volt messen, größere nicht.

Um nun aber auch größere Spannungen messen zu können, hat man ein einfaches Mittel. Man braucht nämlich bloß in die Zweigleitung noch außer dem Galvanometer einen bekannten Widerstand vorzuschalten. Je größer der gesamte Widerstand der Zweigleitung ist, desto geringer ist der Zeigerausschlag für 1 Volt, desto größere Spannungen kann man also noch messen. Deswegen werden solchen Milliamperemetern, wenn man sie zur Messung der Spannungen, also als Voltmeter benutzen will, Widerstände, sogenannte V o r s c h a l t w i d e r s t ä n d e (Fig. 92) beigegeben, mit abgemessenen Widerständen von 19, 99 und 999 Ohm, die man auch in die Zweigleitung einschaltet. Da der erste dieser Widerstände 19 Ohm hat, so ist der ganze Widerstand der Zweigleitung dann 20 Ohm und es entspricht daher ein Grad Ablenkung des Zeigers einem Spannungsunterschied von

Fig. 92



$$20 \text{ Ohm} \times 0{,}001 \text{ Ampere} = 0{,}02 \text{ Volt}.$$

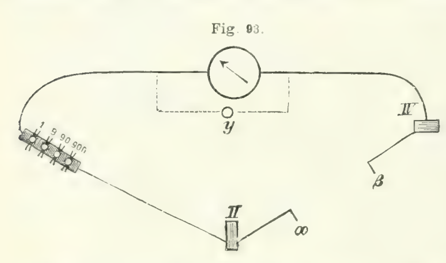
Dadurch kann man also schon Spannungen von 0,02 bis 3 Volt messen.

Schaltet man den zweiten Widerstand, der 99 Ohm groß ist, zum Galvanometer ein, so enthält die Zweigleitung 100 Ohm Widerstand, es entspricht also jeder Grad 100 Ohm $\times$ 0,001 Ampere = 0,1 Volt, so daß man Spannungen von 0,1 bis 15 Volt damit messen kann. Ebenso entspricht bei dem dritten Widerstand (von 999 Ohm) jeder Grad 1 Volt. Dadurch kann man also Spannungsdifferenzen bis 150 Volt messen und im

ganzen also mit Zuhilfenahme eines der Vorschaltwiderstände Spannungen von 0,001 bis 150 Volt.

Das Universalgalvanometer von Siemens & Halske, das oben (S. 92 f.) schon zu Widerstandsmessungen sich als sehr praktisch erwies, läßt sich auch für solche Spannungsmessungen bequem verwenden. Zu dem Zweck ist dem Instrument ein Metallbügel beigegeben, welcher an die Klemmen II und IV angeschraubt wird. Die übrigen Klemmen, sowie der kreisförmig ausgespannte Draht kommen bei diesen Messungen nicht in Betracht, wohl aber die Widerstände 900, 90 und 9 Ohm, welche zur Erzielung der passenden Empfindlichkeit dienen. Diejenigen beiden Punkte eines Stromkreises α und β, zwischen denen die Spannung gemessen werden soll, werden an die Klemmen II und IV geschaltet. Das in dem Instrument angebrachte Loch y (Fig. 93) wird gestöpselt, wodurch die Angaben des Instruments erst wirklich Milliampere werden (für die Widerstandsmessung oben kam es ja darauf nicht an, da das Galvanometer dabei keinen Ausschlag machen soll). Es ordnen sich nun die einzelnen Teile des Instrumentes so, wie es Fig. 93 zeigt. Sind die Widerstände 900, 90 und 9 eingeschaltet, so ist im Galvanometerzweig der Widerstand 1000 Ohm enthalten, da das Galvanometer selbst 1 Ohm Widerstand besitzt. Folglich entspricht jeder Grad Ausschlag der Spannung 1 Volt. Sind bloß 90 und 9 eingeschaltet, so entspricht jeder Grad 0,1 Volt, bei 9 allein 0,01 Volt, und wenn alle Widerstände gestöpselt sind, so entspricht jeder Grad 0,001 Volt.

Fig. 93.

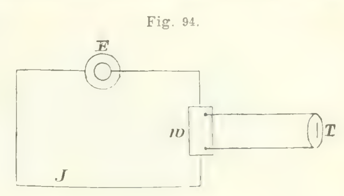


Die dritte Größe, außer der Spannung und dem Widerstand, die bei allen Strömen in Betracht kommt, ist die Stromstärke. Diese mißt man direkt in Ampere, indem man in den Stromkreis selbst ein Galvanometer, speziell ein Amperemeter einschaltet. Die Milliamperemeter, die wir bisher angeführt haben, gestatten allerdings direkt nur geringe Stromstärken zu messen, nämlich solche zwischen 0 und 150 Milliampere. Für noch geringere Stromstärken werden die ganz feinen Galvanometer benutzt, die wir erst im Kap. 7 besprechen werden. Man kann aber mit den Milliamperemetern und überhaupt mit jedem für ganz schwache Ströme eingerichteten Instrument auch leicht Ströme von sehr großer Stärke messen, indem man sich eines einfachen und zweckmäßigen Kunstgriffes bedient. Es werden nämlich diesen Amperemetern genau abgemessene, sehr kleine Widerstände beigegeben, welche in den zu messenden Stromkreis mit eingeschaltet werden (und, da sie eben sehr klein sind, die Stromstärke desselben nur unwesentlich ändern). An die Enden dieser Widerstände, die gewöhnlich $^1/_9$, $^1/_{99}$, $^1/_{299}$, $^1/_{999}$ Ohm betragen, wird nun, und das ist der Kunstgriff, das Milliamperemeter in den Nebenschluß gelegt. Die Schaltung zur Messung der Stromstärke ist also die durch Fig. 94

dargestellte. Von der Batterie E fließt der Strom J, dessen Stärke gemessen werden soll. In diesen ist der kleine Widerstand w (etwa von $^1/_{999}$ Ohm) eingefügt und parallel zu diesem ist das Milliamperemeter T eingeschaltet. Wird nun in diesem Instrument die Nadel um 1 Grad abgelenkt, so wird dasselbe, wie wir wissen, und wie sein Name sagt, von einem Strom von 0,001 Ampere durchflossen. In dem Widerstand von $^1/_{999}$ Ohm fließt dann, nach dem Gesetz der Stromverzweigung von S. 71, ein 999mal so starker Strom, also ein Strom von 0,999 Ampere, da das Galvanometer den Widerstand 1 Ohm hat. Und in dem Hauptstrom, dessen Stärke gemessen werden soll, fließt danach ein Strom von

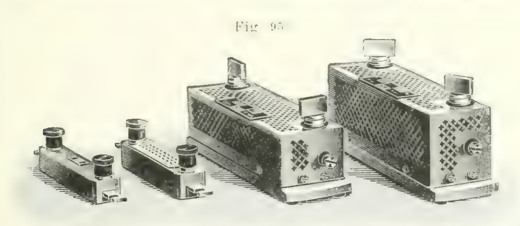
$$0{,}999 + 0{,}001 = 1 \text{ Ampere.}$$

Fig. 94.



Jeder Grad im Milliamperemeter entspricht danach einer Stromstärke von 1 Ampere im Hauptstrom. Hat der eingeschaltete Widerstand nicht $^1/_{999}$, sondern $^1/_9$ oder $^1/_{99}$ oder $^1/_{299}$ Ohm Widerstand, so gibt jeder Grad im Milliamperemeter eine Stromstärke von 0,01 oder von 0,1 oder von 0,3 Ampere im Hauptstrom an. So kann man also Stromstärken von 0,001 bis 150 Ampere mit dem Instrument messen. Die sehr kleinen Widerstände von $^1/_9$ bis $^1/_{999}$ Ohm werden aus dicken Manganinstreifen gebildet, deren Widerstand sich ja auch bei der Erwärmung nicht ändert (S. 84). Die Widerstände, die man Nebenschlüsse nennt, sind in

Fig. 95.

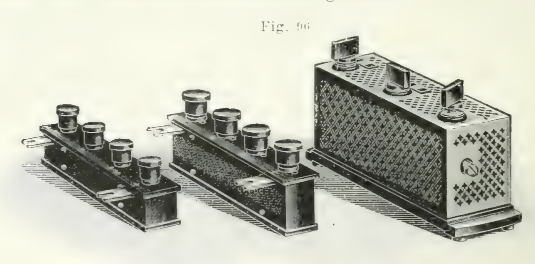


Kästchen mit durchbrochenen Wänden enthalten, wie aus Fig. 95 zu ersehen ist. Zweckmäßig werden häufig mehrere solche verschiedene Nebenschlüsse in einem Kästchen kombiniert, so daß man je nach den angewendeten Klemmen $^1/_9$, $^1/_{99}$ u. s. w. Ohm benutzen kann. Fig. 96 zeigt einige solche kombinierte Nebenschlußwiderstände verschiedener Größe.

Bei dem Universalgalvanometer ist dabei die Schaltung genau dieselbe wie bei der Spannungsmessung. An die Klemmen II und IV wird der beigegebene Bügel angelegt, an diesen einer der kleinen Widerstände von Fig. 95 oder 96 angeschaltet und es wird der zu messende Strom mit durch diesen Widerstand geschickt, während alle Widerstände des Instruments sonst durch die Stöpsel ausgeschaltet sind.

Sehr zweckmäßig werden neuere Präzisionsmeßinstrumente von Siemens & Halske, wie Fig. 97 zeigt, gleich derart eingerichtet, daß man in ihnen sowohl für die Voltmessung wie für die Amperemessung verschiedene Meßbereiche hat, indem die dazu notwendigen Vorschalt- und Nebenschlußwiderstände gleich in dem Boden des Appa-

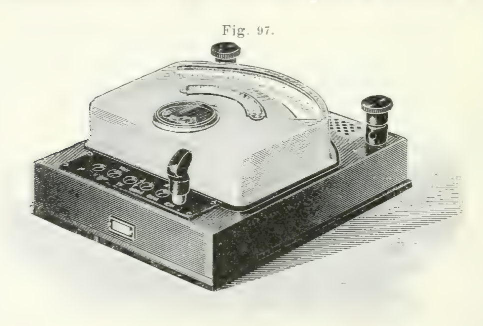
Fig. 96



rates angebracht sind und durch Einstecken des Stöpsels eingeschaltet werden können. So hat das gezeichnete Instrument je nach der Stellung des Stöpsels links für die Spannungsmessung die drei Meßbereiche von 0 bis 3 oder bis 15 oder bis 150 Volt, und beim Einschalten des Stöpsels rechts für die Stromstärken die Meßbereiche von 0 bis 0,15 oder bis 1,5 oder bis 15 Ampere.

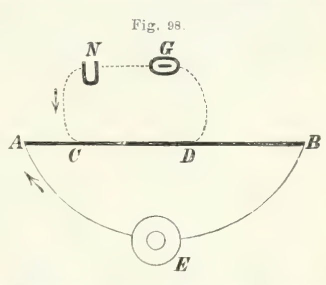
Die Messungen, die zuletzt erwähnt waren, setzen ein geeichtes Amperemeter voraus. Um aber ein solches wirklich zu eichen, resp. seine Eichung zu prüfen, muß man irgend eine mit dem Amperemeter gemessene Stromstärke auch unabhängig von diesem feststellen können. Das gelingt nun aber, nach den großen Fortschritten, die die Wissenschaft in der Untersuchung und die Technik in der Herstellung von Normalelementen und Widerständen gemacht hat, jetzt in leichter Weise. Da nämlich die Normalelemente, insbesondere das Westonelement, eine sehr genau bestimmte und konstante elektromotorische Kraft haben, und da sie leicht und bequem herzustellen und aufzuheben sind, da man ferner elektrische Widerstände mit der größten Genauigkeit herstellen und messen kann, so kann man mit Hilfe dieser Apparate leicht Stromstärken in

Fig. 97.



Ampere bestimmen. Man bedient sich zu diesem Zweck der sogenannten Kompensationsschaltung, die auf der S. 74 besprochenen Stromverzweigung beruht. Wenn wir einen Stromkreis (Fig. 98) bilden aus einer beliebigen Batterie E, beliebigen Drähten E A und E B und einem ausgespannten Draht A B, dessen Widerstand für jeden Zentimeter in Ohm wir kennen, so können wir mit Hilfe eines Normalelementes N und eines Galvanoskops sofort die Stromstärke in dem Kreise E A B in Ampere ermitteln, wenn wir die in der Figur angegebene Schaltung anwenden. Wir legen nämlich das Normalelement einerseits an einen Punkt C an, so daß die Stromrichtung die in der Figur gezeichnete ist, und verbinden andererseits N durch ein Galvanoskop hindurch mit einem Schleifkontakt D auf dem Draht. Verschieben wir den Schleifkontakt so lange, bis das Galvanoskop stromlos ist, so ist die Spannungsdifferenz zwischen den Punkten C und D auf dem Draht gerade gleich der elektromotorischen Kraft des Normalelementes (also z. B. bei dem Westonelement gleich 1,0183 Volt). Der Widerstand von C D aber sollte, wie angenommen, in Ohm bekannt sein. Daher ergibt sich, daß die

Fig. 98.



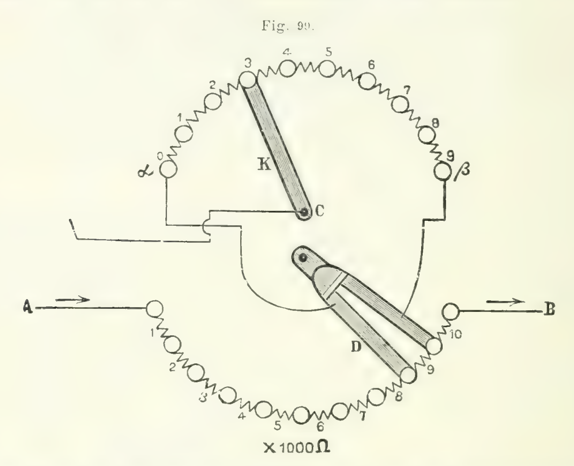
$$\text{gesuchte Stromstärke in } CD = \frac{1{,}0183}{\text{Widerstand von } CD} \text{ Ampere}$$

ist. Dieselbe Stromstärke, welche in dem Stück C D herrscht, herrscht in dem ganzen Stromkreis E A C D B, weil ja der Nebenschluß C N G D stromlos gemacht wurde. Schaltet man in den Stromkreis E A C D B ein Amperemeter ein, so kann man dessen Angaben kontrollieren, da man ja die Stromstärke unabhängig von ihm bestimmen kann. Den Stromkreis C N G D C bezeichnet man als die Kompensationsleitung.

Die Anwendung eines solchen ausgespannten Drahtes, dessen Widerstand für jedes Stück bekannt sein soll, ist nicht bequem, insbesondere dann nicht, wenn man sehr große oder sehr kleine Widerstände C D in die Kompensationsleitung einführen muß. Man nimmt dann viel bequemer an Stelle des ausgespannten Drahtes einen Widerstandskasten, bei dem man leicht alle Widerstände von 0,1 Ohm bis zu 10 000 Ohm durch Stöpseln oder Kurbeln erhalten kann. Aber offenbar muß hier ein solcher Widerstandskasten eine besondere Einrichtung haben. Durch den Gleitkontakt D in Fig. 98 wird ja, wo er sich auch auf dem Draht A B befindet, der gesamte Widerstand dieses Drahtes und damit des ganzen Stromkreises E A B nicht geändert. Tritt D näher an C, so ist der Widerstand C D kleiner, dafür aber der Widerstand A C + D B größer, so daß A B immer denselben Widerstand behält. Würde man aber zwischen C und D einen Widerstandskasten einschalten und von diesem die zur Kompensation von N passenden Widerstände herausnehmen, so würde der gesamte Widerstand von A B

sich ändern. Man muß deshalb vielmehr die Widerstandskasten, die man zwischen A und B einschaltet, so einrichten, daß derselbe Widerstand, den man aus ihnen zwischen C und D einschaltet, zugleich selbsttätig zwischen D und B ausgeschaltet wird und umgekehrt, so daß der gesamte Widerstand zwischen A und B trotz der variablen Stöpselung immer derselbe bleibt. Solche Anordnungen sind in verschiedener Weise ausführbar. Apparate mit solcher Anordnung der Widerstände und zu diesem Zweck bezeichnet man als Kompensationsapparate (im Ausland werden sie häufig als Potentiometer bezeichnet). Es soll hier nur die Anordnung bei dem Apparat von Siemens

Fig. 99.

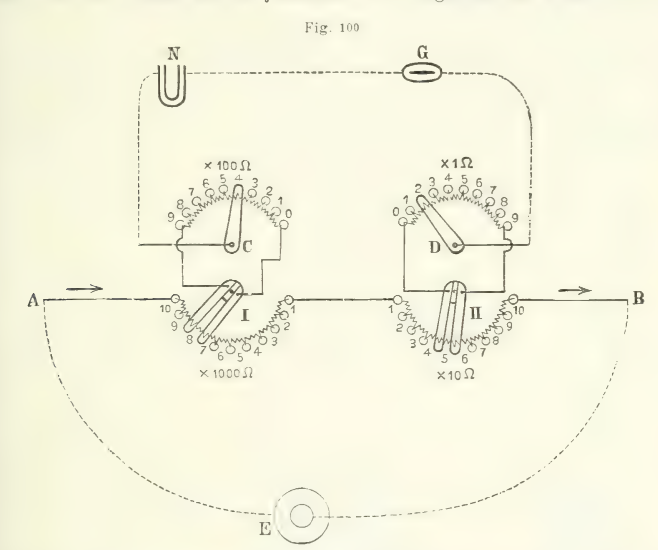


& Halske beschrieben werden. Dabei sind die Widerstandskasten als Kurbelrheostaten (S. 88) ausgebildet und, um nicht zu viel einzelne Rheostaten anbringen zu müssen, ist eine Anordnung der Widerstände getroffen, die zuerst aus Fig. 99 zu ersehen ist. In dieser sind zwischen A und B unten 10mal je 1000 Ohm zwischen den Kontaktknöpfen eingeschaltet. Aber ein aus zwei isolierten Teilen bestehender Hebel D ruht immer auf zwei von diesen Knöpfen und seine beiden Hälften sind mit den Enden α und β des oberen Rheostaten verbunden, der 9 Widerstände von je 1000 Ohm enthält. Dadurch sind zwischen A und B, wo auch die Kurbel D steht, immer 9900 Ohm enthalten. Denn die Kurbel schaltet stets einen der unteren Widerstände von 1000 Ohm mit dem oberen von 9000 Ohm parallel. Zwei solche parallel geschaltete Widerstände entsprechen aber 900 Ohm. Diese und die übrigen 9000 Ohm des unteren Rheostaten sind also dauernd zwischen A und B eingeschaltet.

Diese Anordnung ist nun in dem Kompensationsapparat getroffen, von dem Fig. 100 das Schema gibt. Ein (zu messender) Strom fließt von der Batterie E durch die beiden Doppelkurbelrheostaten I und II, von denen der erstere zwischen zwei Knöpfen je 1000 Ohm, der zweite

je 10 Ohm enthält. Der Gesamtwiderstand des ersteren beträgt also 9900 Ohm, der des zweiten 99 Ohm, der ganze Widerstand zwischen A und B, der also bei allen Lagen der Kurbeln gleich bleibt, ist danach 9999 Ohm. Das Normalelement N ist nun einerseits mit der einfachen Kurbel am Punkte C, andererseits durch das Galvanometer G mit der einfachen Kurbel am Punkte D verbunden. Jedesmal, wenn die erste der beiden Kurbeln um einen Knopf weitergedreht wird, wird infolge der Stromverzweigung ein Widerstand von 100 Ohm zugeschaltet, entsprechend wird bei der zweiten Kurbel jedesmal 1 Ohm zugeschaltet. Man stellt nun

Fig. 100



zunächst die Doppelkurbel I, dann die einfache Kurbel C, dann die Doppelkurbel II, endlich die einfache Kurbel D in solche Lage, daß das Galvanometer stromlos wird. Dann ist in die Kompensationsleitung bei der in der Figur gezeichneten Stellung ein Widerstand von 7442 Ohm eingeschaltet. Ist das Normalelement ein Westonelement, so herrscht also an den Enden dieses Widerstandes eine Spannung von 1,0183 Volt und folglich ist die Größe des durch AB fließenden Stromes, die gemessen werden sollte, gleich $\frac{1,0183}{7442} = 0,0001368$ Ampere. Man findet sofort auch die elektromotorische Kraft des Elementes E. Denn da dieses einen Strom von 0,0001368 Ampere in einem Widerstand von 9999 Ohm (der innere Widerstand des Elements und der Widerstand der Verbindungsdrähte ist dagegen zu vernachlässigen) erzeugt, so besitzt es eine elektromotorische Kraft von $0,0001368 \times 9999 = 1,368$ Volt. Der Kompensationsapparat läßt sich in entsprechender Weise nicht bloß zu Messungen der Stromstärke, sondern

auch zu Messungen der Spannung und des Widerstandes benutzen und erlaubt auch insbesondere einen Strom auf genau bemessene Stärke zu bringen. Da er dies alles nur durch Kombination von Widerständen mit Hilfe eines Normalelements zu erreichen gestattet, so ist er einer der brauchbarsten und vielseitigsten Apparate der gesamten elektrischen Meßtechnik.

Nachdem wir nunmehr das Hauptgesetz des elektrischen Stromes, das Ohmsche Gesetz, kennen, das bei j e d e m elektrischen Strom, mag er herkommen, wo er wolle, gilt, und die auf ihm beruhenden Messungen der Widerstände, elektromotorischen Kräfte, Spannungen und Stromstärken behandelt haben, wollen wir nun die Wirkungen des elektrischen Stromes der Reihe nach besprechen. Ein elektrischer Strom übt sowohl innerhalb seiner Bahn Wirkungen aus, als auch in der Umgebung seiner Bahn. Fast eine jede Wirkung, die der elektrische Strom erzeugt, ist, wie wir sehen werden, imstande, auch selbst wieder einen elektrischen Strom zu erzeugen, wenn man die Einrichtungen dazu zweckmäßig trifft.

---

5. Kapitel.

Die Wärme- und Lichtwirkungen des elektrischen Stromes. Thermoelektrizität.

Wenn ein elektrischer Strom in einem Leiter fließt, so bringt er im Innern des Leiters Wirkungen hervor, die ganz verschiedener Art sind, je nach der Natur des Leiters.

Wir wollen zuerst den Strom vom galvanischen Element aus nur durch Leiter erster Klasse, also durch Metalle oder durch Kohle senden, also nicht durch Flüssigkeiten, außer durch das metallische Quecksilber.

Die hauptsächlichste Wirkung des elektrischen Stromes besteht dann darin, daß er einen jeden solchen Leiter, ein jedes Metall, ein jedes Stück Kohle, durch welches er fließt, erwärmt. Man kann sich davon leicht durch einen Versuch überzeugen, indem man, wie in Fig. 101, einen dünnen Draht, am besten aus Platin, spiralförmig aufwindet und in ein Gefäß J mit Weingeist taucht, in welchem sich ein Thermometer T befindet. Sowie man die Enden des Platindrahtes mit den Polen einer galvanischen Säule G verbindet, fließt der Strom durch den Platindraht (durch den Alkohol nicht, weil Alkohol ein Isolator ist) und der Draht wird dadurch erwärmt. Diese Wärme teilt sich dem Alkohol mit, dessen Temperatur steigt, und die Erhöhung der Temperatur zeigt sich an dem Thermometer an.



Fig. 101

Um die Gesetze dieser Wärmeerzeugung zu ermitteln, beobachten wir zuerst, daß die Temperatur am Thermometer um so höher wird, je länger der Strom durch den Draht fließt. Also finden wir das erste Gesetz, daß die durch den Strom entwickelte Wärmemenge um so größer wird, je längere Zeit der Strom fließt. In 2, 3, 4 Sekunden entwickelt der Strom 2-, 3-, 4mal so viel Wärme als in einer Sekunde.

Diese Wärme wird in jedem einzelnen Teile des Drahtes durch den

Strom erzeugt, und daher ist die nächste Frage die: Wie hängt die Erwärmung eines Drahtstückes mit dem Widerstand desselben zusammen? Der Versuch hat nun gelehrt, daß von einem und demselben Strome in einem Drahtstück um so mehr Wärme erzeugt wird, je größer der Widerstand dieses Drahtstückes ist. Schließen wir z. B. eine galvanische Säule durch einen Schließungskreis, in welchem sich zwei solche Drahtspiralen, wie in Fig. 101, hintereinander geschaltet je in einem Gefäß mit Alkohol und Thermometer befinden, nehmen wir aber die beiden Spiralen so, daß sie ungleichen Widerstand haben, daß die erste z. B. einen 3mal so großen Widerstand hat als die zweite, so zeigen uns die Angaben der Thermometer, daß in der ersten Spirale auch 3mal so viel Wärme entwickelt wurde wie in der zweiten. Die Stärke des Stromes ist im ganzen Stromkreis, also auch in den beiden Spiralen dieselbe; die Erwärmung der einzelnen Leiterstücke hängt also ab von ihrem Widerstand und ist um so größer, je größer der Widerstand ist.

Die dritte Frage ist die: Wie hängt die Erwärmung, die in einem bestimmten Drahtstück erzeugt wird, ab von der Stärke des Stromes? Wir können diese Frage leicht mit unserem Apparat (Fig. 101) beantworten. Schicken wir durch die Spirale einmal einen Strom von 1 Ampere, dann einen Strom von 2 Ampere (indem wir etwa Widerstände, die vorher durch einen Kurbelrheostaten in den Stromkreis eingeschaltet waren, ausschalten und so die Stromstärke vergrößern), dann einen Strom von 3 Ampere, so zeigt sich, daß die Erwärmung der Spirale auch immer größer wird, je größer die Stromstärke ist, und zwar sehr beträchtlich. Wenn statt 1 Ampere 2 Ampere herrschen, so ist die Erwärmung 4mal, wenn 3 Ampere herrschen, ist sie 9mal so groß. Das heißt also: wird die Stärke des Stromes doppelt, dreifach, vierfach so groß, als sie war, so wird die Erwärmung jedes einzelnen Leiterstückes bei sonst gleichen Umständen schon 4-, 9-, 16mal so groß. Die Erwärmung hängt also ab von dem Quadrat der Stromstärke.

Diese drei Größen, die Zeit, der Widerstand des Leiterstückes und die Stärke des durchfließenden Stromes, sind aber auch die einzigen, von welchen die Erwärmung abhängt. In jedem Leiterstück ist die in jeder bestimmten Zeit, also z. B. in einer Sekunde, entwickelte Wärmemenge gleich dem Widerstand des Leiterstückes, multipliziert mit dem Quadrat der Stromstärke.

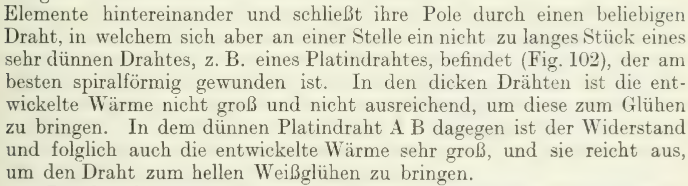
Dieses Gesetz der Wärmeentwickelung durch den galvanischen Strom nennt man nach seinem Entdecker das Joulesche Gesetz, und die entwickelte Wärme auch die Joulesche Wärme.

Von der Größe der elektromotorischen Kraft der Säule ist die entwickelte Wärmemenge ganz unabhängig. Ob man ein Daniellsches Element anwendet oder eine Batterie von zehn hintereinander geschalteten, also mit 10mal so großer elektromotorischer Kraft, es bleibt die in jedem Leiterstück entwickelte Wärmemenge doch dieselbe, vorausgesetzt, daß man (durch Einschalten von Widerständen) dafür sorgt, daß die Stärke des hindurchgehenden Stromes in beiden Fällen dieselbe bleibt.

Man muß sehr genau darauf achten, daß die Erwärmung in einem Stück eines Leiters außer von der Stromstärke nur abhängt von dem Widerstand eben dieses Stückes allein. In einer einfachen Leitung, durch die ein Strom geht, herrscht, wie wir wissen, zwar überall dieselbe Stromstärke. Die entwickelte Wärmemenge aber ist in den einzelnen Teilen der Leitung verschieden, sobald diese verschiedene Widerstände haben.

Die Wärme, die in jedem Stück des Schließungskreises fortwährend entwickelt wird, erhöht nun auch fortwährend die Temperatur dieses Stückes. Ist der Strom stark genug und der Widerstand des Stückes groß genug, so kann diese Temperaturerhöhung eine so bedeutende sein, daß das Stück anfängt zu glühen, rot, gelb, weiß glüht und schließlich sogar schmilzt. Je geringere Masse ein Stück hat, desto leichter wird seine Temperatur erhöht, da ja die Joulesche Wärme sich nicht auf eine zu große Masse zu verteilen braucht. Je dünner also ein Draht ist, und je größer sein Widerstand ist, desto leichter kann er zum Glühen kommen.

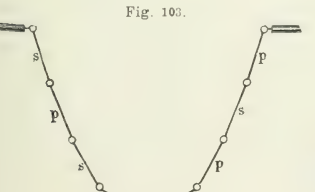
Fig. 102.



Man kann also durch den elektrischen Strom das Glühen eines Drahtes sehr leicht hervorbringen. Man verbindet z. B. drei Bunsensche Elemente hintereinander und schließt ihre Pole durch einen beliebigen Draht, in welchem sich aber an einer Stelle ein nicht zu langes Stück eines sehr dünnen Drahtes, z. B. eines Platindrahtes, befindet (Fig. 102), der am besten spiralförmig gewunden ist. In den dicken Drähten ist die entwickelte Wärme nicht groß und nicht ausreichend, um diese zum Glühen zu bringen. In dem dünnen Platindraht A B dagegen ist der Widerstand und folglich auch die entwickelte Wärme sehr groß, und sie reicht aus, um den Draht zum hellen Weißglühen zu bringen.

Durch sehr starke Ströme kann man dicke Kupferstäbe, ja ganze Kupferbarren kiloweise zum Schmelzen bringen, wie es in New York unbeabsichtigterweise bei der ersten Einrichtung von elektrischen Zentralstationen geschah.

Fig. 103.



Die Abhängigkeit der Wärmeentwickelung von dem Widerstand eines Drahtstückes kann man durch folgenden hübschen Versuch deutlich erkennen. Wie wir auf S. 81 gesehen haben, ist der spezifische Widerstand des Platins größer als der des Silbers. Leitet man also einen Strom durch eine Reihe von gleich langen und gleich dicken Platinstücken p und Silberstücken s, wie Fig. 103 zeigt, so ist der Widerstand und daher auch die Erwärmung jedes Platinstückes größer als die jedes Silberstückes. Man kann also, wenn man den Strom passend stark wählt, bewirken, daß die Platin-

drähte alle ins Glühen kommen, die Silberdrähte aber noch dunkel bleiben. Solche Versuche kann man in verschiedenen Variationen anstellen.

Diese Joulesche Wärme, durch welche Teile des Stromkreises mehr oder minder stark erwärmt und sogar zum Glühen gebracht werden, wird vielfach benutzt. Man bedient sich dieser Eigenschaft in der Medizin, wo man darauf das galvanokaustische Verfahren gegründet hat; man bedient sich dieser Wirkung zur Entzündung von Sprengmaterialien. Man benutzt diese Wirkung zu Zwecken des Heizens und Kochens, wie im zweiten Abschnitt ausführlich gezeigt werden wird. Endlich hat diese Eigenschaft des Stromes ihre wichtigste Anwendung dadurch gefunden, daß man durch Edison gelernt hat, sie zum Beleuchten von Wohnungen zu benutzen.

Fig. 104.

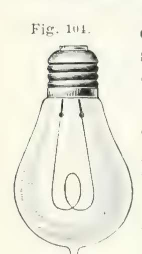
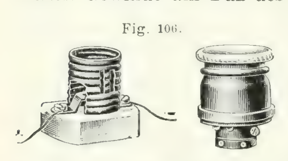


Fig. 105.



Die Glühlampen, wie man die auf diesem Prinzip beruhenden Lampen nennt, sind entweder Kohlenfadenlampen oder Metallfadenlampen. Bei ersteren wird ein dünnes Kohlenstreifchen, welches gewöhnlich hufeisenförmig gebogen oder geschlungen ist, bei den letzteren ein mehrfach hin und her geführter dünner Metalldraht — jetzt meistens aus Wolfram bestehend — vom Strom durchflossen und zum Glühen gebracht. Der dünne Leiter ist in beiden Fällen in ein luftleeres Glasgefäß eingeschlossen. Fig. 104 zeigt eine solche Kohlenfadenlampe, Fig. 105 eine Metallfadenlampe (Osramlampe). Da die dünnen Fäden sehr großen Widerstand haben, so kommen sie durch den Strom in helles Glühen. Die Fäden sind, um den Strom hindurchleiten zu können, an den Kontakten des Glaskörpers befestigt, nämlich mit dem einen Ende an dem metallischen Gewinde am Fuß des Glases, mit dem anderen Ende an dem von dem Gewinde isolierten Metallboden des Glases. Die Glühlampen werden in die zu ihnen passenden Fassungen eingesetzt, von denen Fig. 106 zwei Formen zeigt. Sie bestehen aus der zu dem Gewinde der Lampe passenden Mutter aus Metall und einer davon isolierten Metallfeder am Boden.

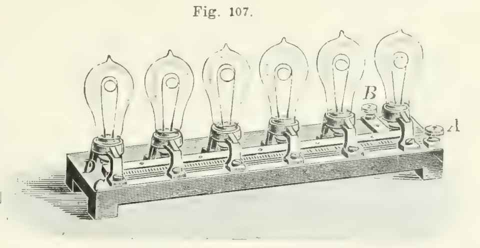
Fig. 106.



Der Boden einerseits, die Metallmutter andererseits werden mit den von der Stromquelle kommenden Leitungen verbunden, und wenn die Lampe eingeschraubt ist, so daß Boden und Boden sich berühren, so geht der Strom durch die Lampe, bei geringem Herausdrehen der Lampe aus der Fassung ist er unterbrochen. Hauptsächlich werden die Glühlampen dort benutzt, wo durch eine Zentrale oder eine eigene Maschine elektrischer Strom verteilt wird, und zwar hat sich in den meisten Fällen die Einrichtung eingebürgert, daß die Zentrale oder die Maschine eine elektrische Spannung von 110 Volt erzeugt. Zwischen solche zwei Leiter, welche 110 Volt Spannung besitzen, werden die Glühlampen, alle parallel, geschaltet. In diesem gewöhnlich vorkommenden Fall erhalten dann die Kohlenfadenlampen für 16 Kerzen, welche die gebräuchlichsten sind, etwa

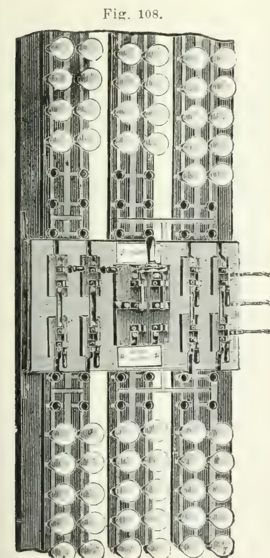
0,45 Ampere Stromstärke, die von 25 Kerzen etwa 0,65 Ampere, während die Metallfadenlampen weniger Strom brauchen, nämlich für 25 Kerzen bloß etwa 0,27 Ampere.

Fig. 107.



Man kann aus diesen Angaben sofort berechnen, wie groß der Widerstand dieser Lampen ist, wenn sie im Glühen sind. Dieser Widerstand muß ja nach dem Ohmschen Gesetz gleich der Spannung von 110 Volt, dividiert durch die verbrauchte Stromstärke sein. So findet man, daß die Kohlenfadenlampen von 16 Kerzen etwa 275, die von 25 Kerzen etwa 170 Ohm Widerstand besitzen, während die Osramlampe von 25 Kerzen etwa 400 Ohm Widerstand hat.

Fig. 108.



Ausführlich handelt über die Glühlampen das 6. Kapitel im zweiten Teil dieses Werkes. Hier sei nur eine Anwendung der Glühlampen für physikalische Zwecke erwähnt. Da die Glühlampen große Widerstände haben, billig sind und verhältnismäßig starke Ströme vertragen, so kann man sich mit ihnen auf billige Weise Rheostaten zusammensetzen, welche für große Stromstärken geeignet sind, Rheostaten, welche, wenn sie aus Drähten gefertigt wären, außerordentlich kostspielig wären. Ein solcher Glühlampenrheostat ist in Fig. 107 abgebildet. Zwischen zwei Metallschienen A C und B D sind 6 Glühlampen mit ihren Fassungen parallel geschaltet. Hat jede etwa 270 Ohm Widerstand, so ist der Gesamtwiderstand, wenn alle Lampen eingeschaltet sind, 45 Ohm. Da ferner jede zum normalen Brennen etwa 0,45 Ampere verbraucht, so kann man bei Parallelschaltung aller 6 Lampen bei 110 Volt Spannung 2,7 Ampere Stromstärke durch die Schienen und die Leitung senden. Durch Herausdrehen einer oder mehrerer Lampen aus ihren Fassungen wird der Widerstand vergrößert und die durchgehende Stromstärke vermindert. Eine größere Form eines solchen Lampenrheostaten (von Siemens & Halske) zeigt Fig. 108. In diesem sind 3mal zwei Reihen von Glühlampen angebracht, von denen jede Reihe die Lampen parallel geschaltet enthält, während die Reihen selbst nach Belieben hintereinander oder parallel geschaltet werden können. In der Mitte

des Rheostaten sind die erforderlichen Ausschalter und Umschalter angebracht.

Die Tatsache, daß ein Strom seinen eigenen Stromkreis erwärmt, ist nach dem Prinzip der Erhaltung der Energie, dem allgemeinsten Satz, den die Physik aufzuweisen hat, direkt einzusehen, ja es läßt sich aus diesem Prinzip sogar das Joulesche Gesetz direkt ableiten. Das Gesetz der Erhaltung der Energie sagt nämlich aus, daß bei allen physikalischen Erscheinungen Arbeit (oder allgemein Energie, worunter man Arbeit in irgend einer Form versteht) weder gewonnen noch verloren gehen kann. Die Hervorbringung einer jeden physikalischen Erscheinung erfordert einen gewissen Aufwand von Arbeit, die Vernichtung derselben muß daher eine ebenso große Menge Arbeit freimachen. In einem elektrischen Strom gleichen sich nun fortwährend die Elektrizitäten aus, welche vom Zinkpol zum Kupferpol und vom Kupferpol zum Zinkpol fließen, sie vereinigen sich fortwährend gegenseitig. Da man nun zur Erzeugung oder, besser gesagt, zur Trennung der Elektrizitäten Arbeit aufwenden muß, so muß die Vereinigung derselben fortwährend Arbeit freimachen.

Leistet nun der Strom nicht wirklich mechanische Arbeit (und wir werden sehen, daß wir ihn dazu benutzen können, wenn wir wollen), so verwandelt sich die gesamte frei gewordene Arbeitsmenge in Wärme. Dies ist der tiefere physikalische Grund dieser Jouleschen Wärmeentwickelung. Wir können aber auch direkt das Joulesche Gesetz durch Überlegungen ableiten, die von dem Prinzip der Erhaltung der Energie ausgehen. Der Spannungsunterschied zweier Leiter in Volt war auf S. 16 definiert als diejenige Arbeit, welche die elektrischen Kräfte leisten, um 1 Coulomb von der höheren zur niederen Spannung zu bringen. Wird also nicht 1 Coulomb, sondern werden etwa 5 Coulomb von einem Leiter, der die Spannung 6 Volt besitzt, auf einen Leiter übergeführt, der die Spannung 2 Volt besitzt, so ist die Arbeit, die dabei frei wird, $5 \times (6 - 2) = 20$ Volt-Coulomb, oder da 1 Volt $\times$ 1 Coulomb $= \frac{1}{9{,}81}$ Kilogrammeter ist (S. 16), gleich $\frac{20}{9{,}81}$ Kilogrammeter. (Man multipliziert also nicht bloß die Zahlen miteinander, sondern auch die Benennungen. 1 Volt-Coulomb ist eine gewisse Arbeit, nämlich $= 10^7$ Erg $= \frac{1}{9{,}81}$ Kilogrammeter.) Allgemein: Wenn eine bestimmte Anzahl Coulomb von einer höheren Spannung zu einer niedrigeren fällt und die Spannungen in Volt gemessen werden, so ist die dabei frei werdende Arbeit gleich:

Anzahl der Coulomb $\times$ Differenz der Volt (Benennung: Volt-Coulomb).

In jedem Stück eines Drahtes nun, durch den ein elektrischer Strom geht, fließt fortwährend die positive Elektrizität von der höheren Spannung nach der niederen Spannung, und die Differenz der Spannungen ist ja gerade das, was wir den Spannungsverlust in diesem Stück genannt haben. Es wird also dabei stets Arbeit frei. In jeder Sekunde fließt so eine gewisse Menge Elektrizität ab und die Anzahl der Coulomb, die in einer Sekunde abfließen, haben wir ja als die Stärke des Stromes be-

zeichnet und in Ampere ausgedrückt. Daher ist die in jeder Sekunde in einem stromdurchflossenen Drahtstück frei werdende Arbeit gleich

Spannungsverlust in Volt × Stromstärke in Ampere.

Die Größe der von irgend einer Maschinerie in jeder Sekunde geleisteten Arbeit nennt man den Effekt dieser Maschinerie. Es besitzt also ein elektrischer Strom in jedem Stück seiner Bahn einen gewissen Effekt, und wir können sagen, indem wir wieder die Benennungen auch multiplizieren, der Effekt in einem Stromstücke ist gleich

Spannungsverlust × Stromstärke (Volt-Ampere).

Die Größe eines Effekts mißt man nun gewöhnlich in Watt, wobei 1 Watt derjenige Effekt ist, bei dem in jeder Sekunde 10 Millionen Erg, das ist der 9,81. Teil eines Kilogrammeters geleistet wird. 1 Watt ist daher gerade gleich 1 Volt-Ampere und in unserem Stromstück herrscht der Effekt

Spannungsverlust × Stromstärke (Benennung: Watt).

Statt dieses Ausdrucks für den Effekt in einem Drahtstück kann man auch folgenden bilden. Da der Spannungsverlust in einem Drahtstück gleich dem Produkt aus seiner Stromstärke in Ampere und seinem Widerstand in Ohm ist, so ist der Effekt auch gleich

Quadrat der Stromstärke × Widerstand (Benennung: Watt).

Dieser Effekt verwandelt sich also ganz in Wärme, in jeder Sekunde wird durch diesen Effekt eine gewisse Wärmemenge entwickelt, und die Größe dieser per Sekunde erzeugten Wärmemenge in einem Drahtstück ist also gleich dem Spannungsverlust in diesem Drahtstück, multipliziert mit der Stromstärke, oder, was dasselbe ist, auch gleich

Quadrat der Stromstärke × Widerstand des Drahtstückes,

und dies ist das Joulesche Gesetz, das also aus dem Satz von der Erhaltung der Energie folgt.

Für große Effekte nimmt man als Einheit jetzt 1 Kilowatt, welches gleich 1000 Watt ist, so daß unser Drahtstück auch den Effekt hat

$$\frac{\text{Spannungsverlust} \times \text{Stromstärke}}{1000} \text{ Kilowatt.}$$

Der Effekt von Maschinen wird in der Technik gewöhnlich in Pferdekräften ausgedrückt. Unter einer Pferdekraft (PS) versteht man denjenigen Effekt, bei welchem in jeder Sekunde 75 Kilogrammeter Arbeit geleistet werden. Da 1 Kilowatt der Effekt ist, bei dem in der Sekunde $\frac{1000}{9{,}81} = 102$ Kilogrammeter Arbeit geleistet werden, so ist 1 Kilowatt gleich 1,36 Pferdekräften und daher ist auch der Effekt in einem Drahtstück leicht in Pferdekräften auszudrücken. Fließt also ein Strom mit der Stromstärke 20 Ampere durch einen Draht, an dessen Enden der Spannungsunterschied 150 Volt ist, so ist der elektrische Effekt dieses Stromstückes

$$20 \times 150 = 3000 \text{ Watt} = 3 \text{ Kilowatt} = 4{,}08 \text{ PS.}$$

In jeder Sekunde kann also der Strom in dem Drahtstück diese bestimmte Arbeit leisten und in dem ganzen Stromkreis daher die Summe

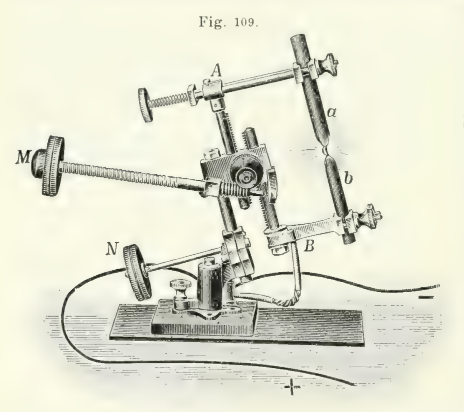
aller der einzelnen Arbeiten. Selbstverständlich muß irgendwo im Stromkreise ein Grund dafür, eine Quelle für diese Arbeit vorhanden sein, und wir werden sehen, daß die Quelle dieser Arbeit in den chemischen Kräften der galvanischen Elemente steckt.

Die Joulesche Wärme ist selbstverständlich immer dieselbe, mag nun der Strom in der einen Richtung durch die Leitung gehen oder in der anderen. Es ist deshalb auch, wenn man Drähte zum Glühen bringen will, ganz gleichgültig, in welcher Richtung man den Strom durch die Drähte sendet.

Im Jahre 1821 beobachtete der englische Physiker Davy eine höchst merkwürdige und glänzende Erscheinung, welche von dieser Jouleschen Wärmeentwickelung mit abhängt. Als er nämlich die Pole einer sehr starken galvanischen Batterie mit zwei Stäben aus Kohle verband, so daß ein starker elektrischer Strom durch sie hindurchging, dann aber die Enden der beiden Kohlen etwas voneinander entfernte, so daß eigentlich der Strom unterbrochen sein mußte, so entstand zwischen den Kohlen ein außerordentlich helles Licht. Es kamen die Enden der Kohlen in helle Weißglut und ebenso glühte die Luft bläulich zwischen ihnen und der Strom war nicht unterbrochen, sondern dauerte an.

Diese Erscheinung nennt man den elektrischen Lichtbogen oder Flammenbogen und das Licht selbst daher Bogenlicht. Es erklärt sich die Erscheinung daraus, daß die Kohlen, solange sie sich noch berühren, durch den Strom erwärmt werden und wenn sie dann voneinander getrennt werden, zum Teil zerstäuben, d. h. daß Kohlenpartikelchen von ihnen durch die trennende Luftschicht hindurchfliegen, welche nun auch den Übergang des elektrischen Stromes vermitteln. Aber in dieser Kohlendampfschicht findet der Strom einen großen Widerstand und es gehört daher einerseits eine große Spannung des Stromes dazu, um diesen Widerstand zu überwinden, und andererseits geht diese Überwindung des großen Widerstandes nur mit Entwickelung von Wärme vor sich, die hierbei so stark wird, daß die Enden der Leiter, zwischen denen die Luft sich befindet, und die Luft selbst ins Glühen kommen.

Fig. 109.

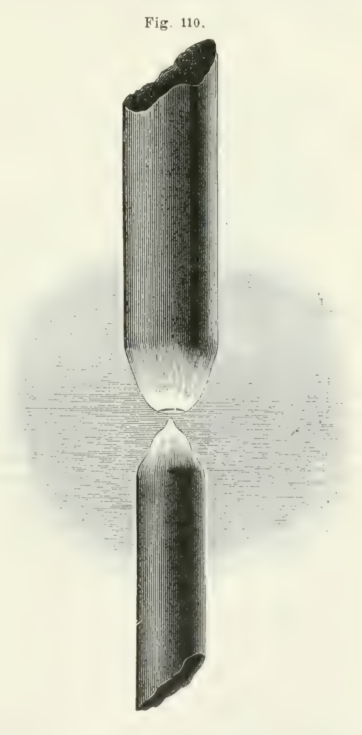


Der Vorgang, durch den der Lichtbogen zustande kommt, ist ein ziemlich komplizierter, und wir kommen in Kapitel 12 darauf noch zurück. Man bezeichnet die Leiter, zwischen denen die glühende Luftschicht sich befindet, als die Elektroden. Je leichter zerteilungsfähig

die Substanz der Elektroden ist, um so leichter bildet sich der Lichtbogen, wenn man eine hohe Spannung, von 30—60 Volt, auf die beiden Leiter wirken läßt.

Sehr gut zeigen diese Erscheinungen Elektroden von Zink, von Eisen oder von Quecksilber. Am schönsten und glänzendsten wird aber dieses Phänomen, wenn man den Strom zwischen Kohlen durch Luft übergehen läßt. Immer aber müssen die Elektroden einander zuerst berühren und dann erst getrennt werden, damit der Lichtbogen entsteht. Eine Abbildung einer zur Erzeugung des Lichtbogens brauchbaren Einrichtung gibt Fig. 109. Bei + und — kommen die Leitungsdrähte von der galvanischen Batterie und der Strom geht durch die Metallhalter A und B zu den runden Kohlenstäben a und b, die zuerst in Berührung miteinander sind, damit der Strom überhaupt fließen kann, und die dann durch Drehen des Griffes M getrennt und in geringer Entfernung voneinander gehalten werden und zwischen sich eine kleine Luftschicht haben. Ist nun die Spannung an den Kohlenenden groß genug, so geht zwischen diesen der Strom über und bildet dabei den Flammenbogen, wie er in der Figur angedeutet ist.

Fig. 110.



Von den Enden der Kohlen, insbesondere von demjenigen, welches mit dem positiven Pol der Batterie verbunden ist, fliegen die glühenden Teilchen zu dem anderen über. Hat man die Kohlenenden zuerst beide zugespitzt, so ist nach kurzer Zeit die Spitze an der positiven Kohle verschwunden und es hat sich an ihrer Stelle ein Krater gebildet, von welchem aus die Teilchen zur negativen Kohle überfliegen. Die negative Kohle bleibt spitz. Nachdem der Flammenbogen eine Zeitlang bestanden hat, sehen die Enden der Kohlen so aus, wie es Fig. 110 zeigt. Die Temperatur der weißglühenden Kohlenenden ist eine sehr bedeutende. Die positive Kohle, welche den Krater bildet, hat eine Temperatur von etwa 3700, die negative, zugespitzte Kohle eine solche von etwa 2500 ^{0} C. Die beiden Kohlen brennen natürlich durch die Hitze ab, die Kohle verbindet sich in der Hitze mit dem Sauerstoff der Luft zu Kohlenoxyd und Kohlensäure,

und da von der positiven Kohle noch außerdem eine Menge von Teilchen gegen die negative hingeschleudert werden, so wird die positive Kohle rascher kleiner als die negative. Erfahrungsgemäß brennt sie etwa doppelt so rasch ab als die negative. Durch das Abbrennen der Kohlen wird der Abstand, die Luftschicht, zwischen ihnen immer größer, und der Flammenbogen würde erlöschen, wenn man nicht dafür sorgt, daß die Kohlen einander in dem Maße wieder genähert werden, wie sie abbrennen. Das kann man natürlich einige Zeit mechanisch mit der Hand machen. Um den Lichtbogen aber dauernd zu erhalten, muß man für selbsttätige Vorrichtungen sorgen. Derartige sind in großer Anzahl ersonnen und im zweiten Teil dieses Werkes, Kapitel 5, werden wir die hauptsächlichsten dieser Konstruktionen, die elektrischen Bogenlampen, besprechen.

Das elektrische Bogenlicht übertrifft an Helligkeit alle anderen Lichtquellen, die wir auf Erden bis jetzt erzeugen können, ganz bedeutend. Es ist deshalb ganz außerordentlich geeignet, um zur Beleuchtung von Städten, von Straßen und Plätzen zu dienen.

Fig. 111.

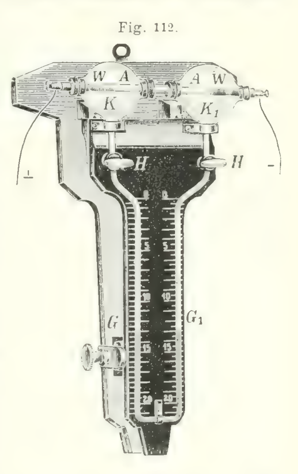
Daß man auch zwischen anderen Leitern als Kohlen den Lichtbogen erzeugen kann, ist oben bereits erwähnt worden. Für physikalische, insbesondere optische Versuche hat sich der Lichtbogen zwischen Elektroden aus Quecksilber von Wichtigkeit erwiesen. Dieser wird leicht und bequem in der Quecksilberbogenlampe von Arons erzeugt, die in Fig. 111 abgebildet ist und bei welcher, das ist der wesentlichste Punkt, der Lichtbogen im Vakuum entsteht. Die ganze Lampe besteht aus Glas oder noch besser aus Quarz, welchen man jetzt in passende Formen zu bringen imstande ist. Man sieht das Quecksilber unten in den beiden Schenkeln, in welche durch die Ansätze Platindrähte eingeführt sind. Diese dienen zur Verbindung mit einer Batterie von mindestens 60 Volt Spannung. Die beiden Quecksilberkuppen berühren sich zunächst nicht. Durch langsames Neigen der Lampe kann man das Quecksilber aus dem einen Schenkel in den anderen überfließen lassen und sobald die bisher getrennten Quecksilbermassen sich berühren, geht der Strom hindurch und wenn die Röhre nun wieder vertikal gestellt wird, so entwickelt sich über den beiden Kuppen bei R der Lichtbogen, der hellgrünlichweiß leuchtet und der beliebig lange andauern kann. Zerlegt man das Licht dieses Bogens durch ein Prisma, so findet man in demselben die hellen grünen, gelben und violetten Quecksilberlinien. Insbesondere ist das Licht aber reich an ultravioletten Strahlen, und um diese nicht durch Glas zu sehr zu schwächen, macht man eben jetzt solche Lampen (in etwas anderer Form) aus Quarz, die noch den Vorzug haben, nicht zu zerbrechen. Diese Quecksilberbogenlampen haben in den letzten Jahren auch praktische Anwendungen gefunden und wir werden die neueren Formen, in denen sie konstruiert werden, im zweiten Teil, Kapitel 5, besprechen.

Während die bisher besprochene Joulesche Wärme in jedem Stück

eines Stromkreises erscheint und eben nur das Äquivalent für die freiwerdende Arbeit ist, zeigt der elektrische Strom in manchen Fällen noch Wärmewirkungen anderer Art.

Wenn man den Schließungsdraht eines galvanischen Elementes so einrichtet, daß er nicht aus einem Metall, sondern aus zwei verschiedenen, aneinander gelöteten oder sonst fest miteinander verbundenen Metallen, z. B. aus Kupfer und Eisen besteht, so tritt an der Lötstelle noch eine andere Wärmewirkung auf, nämlich eine Erwärmung oder Abkühlung, je nach der Richtung, in welcher der Strom durch die Lötstelle fließt. Am kräftigsten zeigt sich diese Wirkung, wenn man den Strom durch einen Stab gehen läßt, der aus Wismut und Antimon zusammengesetzt ist. Geht der Strom vom Wismut zum Antimon, so wird die Lötstelle abgekühlt; geht er vom Antimon zum Wismut, so wird sie erwärmt. Um diese Wirkungen, die immer recht schwach sind, deutlich zu zeigen, bedient man sich vorteilhaft des Apparates Fig. 112, der von Ernecke-Berlin hergestellt wird. An einen Antimonstab A A sind an beiden Enden kleinere Wismutstäbe W angelötet und der zusammengesetzte Stab ist in die beiden Kugeln K und K_1 so durch Kautschukstopfen eingesetzt, daß die eine Lötstelle W A sich in der einen, die andere A W sich in der anderen Kugel befindet. Die Kugeln sind durch ein U-förmiges Rohr, in dessen Biegung unten sich Wasser befindet, miteinander verbunden. Wird durch die Drähte + — ein Strom (etwa von einem Akkumulator) von links nach rechts durch den Apparat geschickt, so entsteht in K eine Abkühlung, in K_1 eine Erwärmung. Die Luft in K_1 dehnt sich aus, die in K zieht sich zusammen, und wenn die Hähne H H geöffnet sind, so sinkt das Wasser bei G_1 und steigt bei G. Man nennt diese Wirkung des Stromes nach ihrem Entdecker, Peltier, die Peltiersche Wirkung und die positive oder negative erzeugte Wärme die Peltiersche Wärme. Die Peltiersche Wärme ist in unserem Falle positiv, also eine wirkliche Erwärmung, wenn der Strom vom Antimon zum Wismut geht; negativ, also eine Abkühlung, wenn der Strom vom Wismut zum Antimon geht.

Fig. 112.



Ganz so wie bei Wismut und Antimon tritt immer bei je zwei zusammengelöteten Metallen die Peltiersche Wärme auf, wenn ein Strom durch sie hindurchgesendet wird. In welcher Richtung der Strom fließen muß, damit die Lötstelle abgekühlt wird, das hängt von der Natur der zusammengelöteten Metalle ab. Die Erfahrung hat nun gelehrt, daß immer, wenn Wismut mit einem anderen Metall, Antimon, Eisen, Silber, Kupfer, Gold u. s. w. zusammengelötet ist, die Lötstelle abgekühlt wird, wenn der positive Strom vom Wismut zu dem anderen Metall durch die

Lötstelle geht. Es lassen sich überhaupt alle Metalle in eine Reihe so ordnen, daß die Lötstelle immer abgekühlt wird, wenn der Strom vom vorhergehenden zum folgenden Metall geht. In der folgenden Reihe sind einige Metalle so zusammengestellt. Man nennt sie die thermoelektrische Spannungsreihe.

Die thermoelektrische Spannungsreihe:

Wismut,
Quecksilber,
Platin,
Gold,
Kupfer,
Zinn,
Blei,
Zink,
Silber,
Eisen,
Antimon.

Wenn man z. B. einen Stab hat, der aus Eisen und Kupfer zusammengelötet ist, und wenn man wissen will, in welcher Richtung man den Strom hindurchsenden muß, damit die Lötstelle abgekühlt wird, so findet man aus obiger Reihe, daß man den Strom vom Kupfer durch die Lötstelle zum Eisen senden muß. Denn Kupfer steht in der Reihe vor dem Eisen. Schickt man den Strom in der entgegengesetzten Richtung hindurch, so wird die Lötstelle erwärmt.

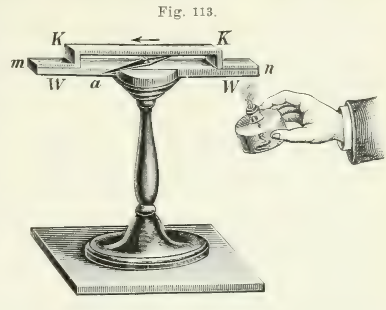
Bei dieser Peltierschen Wirkung des elektrischen Stromes stoßen wir nun zum ersten Male auf die Umkehrbarkeit von elektrischen Vorgängen.

Ebenso nämlich, wie ein elektrischer Strom an der Lötstelle zweier Metalle eine besondere Erwärmung oder Abkühlung hervorbringt, je nach seiner Richtung, ebenso bringt umgekehrt auch eine äußere Erwärmung oder Abkühlung der Lötstelle zweier zu einem geschlossenen Kreis verbundenen Metalle einen elektrischen Strom hervor.

Man kann dies sehr leicht zeigen. In Fig. 113 ist W W ein Wismutstreifen, an welchem ein Kupferbügel K K angelötet ist (bei m und n). In dem Hohlraum zwischen beiden Metallen befindet sich eine drehbar aufgesetzte Magnetnadel a als Galvanoskop. Sowie man nun die eine Lötstelle, etwa n, erwärmt, entsteht ein elektrischer Strom, den man daraus erkennt, daß er die Magnetnadel ablenkt. Der Strom fließt in dem ganz geschlossenen metallischen Kreise, und zwar hat der positive Strom die Richtung des Pfeiles von dem Wismut durch die warme Lötstelle zum Kupfer und von diesem durch die kalte Lötstelle zurück. Ganz ebenso entsteht ein Strom, wenn man die Lötstelle n kälter macht als die andere, indem man sie z. B. mit Eis umgibt. Dann fließt der positive Strom bei n entgegengesetzt, nämlich vom Kupfer durch die kalte Lötstelle zum Wismut, also auch wieder durch die wärmere Lötstelle bei m vom Wismut zum Kupfer. Man nennt diese Ströme Thermoströme oder thermoelektrische Ströme. Sie wurden von Seebeck

im Jahre 1823 entdeckt. Wir haben also hier galvanische Ströme, welche nicht in galvanischen Elementen entstehen, sondern welche nur durch einfache Wirkung der Wärme hervorgebracht werden. Sobald man irgend zwei verschiedene Metalle zu einem geschlossenen Kreis zusammenlötet und die eine Lötstelle auf eine andere Temperatur bringt als die andere, so fließt in diesem Kreis ein elektrischer Strom. Dieser hat immer eine Richtung, die von der Natur der beiden Metalle abhängt. Wenn man alle Metalle der Reihe nach miteinander in thermoelektrische Verbindung bringt, so kann man sie ebenfalls wieder in eine Reihe so ordnen, daß immer der positive Strom durch die erwärmte Lötstelle vom vorhergehenden zum folgenden Metall geht. Diese Reihe ist dieselbe wie die schon vorher angeführte thermoelektrische Spannungsreihe:

Fig. 113.



Wismut, Quecksilber, Platin, Gold, Kupfer, Zinn, Blei, Zink, Silber, Eisen, Antimon.

Wismut und Antimon stehen in der Reihe am weitesten auseinander. Sie geben also die stärksten Thermoströme.

Man bezeichnet zwei miteinander verbundene Metalle, deren beide Verbindungsstellen auf verschiedenen Temperaturen gehalten werden, als ein Thermoelement.

Um in den Kreis eines Thermoelements beliebige Widerstände einzuschalten, um den Strom eines Thermoelements durch alle möglichen Apparate gehen zu lassen, schneidet man den einen der beiden Drähte des Thermoelements auf und verbindet seine freien Enden mit dem äußeren Stromkreis.

Bei einem Thermoelement ist, wie bei jedem galvanischen Element, nach der elektromotorischen Kraft und dem inneren Widerstand zu fragen.

Die elektromotorische Kraft eines Thermoelements hängt natürlich ab von der Art der beiden Metalle, welche in Verbindung gebracht sind, und sie hängt wesentlich ab von dem Temperaturunterschied der beiden Lötstellen. Je größer der Unterschied der Temperaturen an den beiden Lötstellen ist, desto größer ist die elektromotorische Kraft des Thermoelements. Das gilt jedoch nicht bis zu allen Temperaturen. Bei höheren Temperaturen wird oft die Struktur eines oder beider Metalle eine andere und infolgedessen wird dann oft die elektromotorische Kraft bei größerer Temperaturdifferenz nicht größer, sondern kleiner.

Der innere Widerstand eines Thermoelements ist im allgemeinen sehr klein, da das Element ja nur aus gutleitenden Metallen besteht.

Was nun die Größe der elektromotorischen Kräfte von Thermoelementen anbetrifft, so haben diese nur dann eine bestimmte,

unveränderliche Größe, wenn man die beiden Lötstellen des Elements auf konstanter, gleichbleibender Temperatur erhält. Zu dem Ende bringt man z. B. die eine Lötstelle in schmelzendes Eis, wo sie die Temperatur 0 ^{0} bekommt, die andere in siedendes Wasser, wo sie die Temperatur 100 ^{0} bekommt.

Die elektromotorischen Kräfte aller Thermoelemente aus Metallen sind sämtlich nur kleine Bruchteile eines Volt. Wir wollen sie in Millivolt, d. h. in Tausendstel-Volt, ausdrücken. Je nach der Reinheit der Metalle ist die elektromotorische Kraft von Thermoelementen oft sehr verschieden, sie hängt auch davon ab, ob die Metalle hartgezogen oder weich angewendet werden. Im folgenden sind eine Anzahl von Metallen mit Quecksilber kombiniert und ihre elektromotorischen Kräfte angegeben, wenn die Temperaturdifferenz der Lötstellen 100 ^{0} beträgt. Dabei zeigt das Zeichen + an, daß der erzeugte Thermostrom durch die warme Lötstelle vom Quecksilber zum anderen Metall geht, das Zeichen —, daß er durch die warme Lötstelle vom anderen Metall zum Quecksilber geht.

Elektromotorische Kraft in Millivolt (zwischen 0 und 100 ^{0}).

Quecksilber-Wismut	— 6,70
„ -Nickel	— 1,66
„ -Neusilber . . .	— 1,08
„ -Platin	+ 0,004 bis + 0,59
„ -Aluminium . . .	+ 0,36
„ -Kupfer (rein) . .	+ 0,72
„ -Gold	+ 0,71
„ -Eisen	+ 1,60 bis 1,73
„ -Antimon	+ 3,38.

Für die thermoelektrischen Kräfte gilt nun erfahrungsgemäß das Gesetz der Spannungsreihe, welches sich so ausdrückt: Sind A und B zwei beliebige Metalle und bezeichnet man die elektromotorischen Kräfte zwischen den zwei Metallen durch A | B, so ist

$$\text{Quecksilber} \mid A + A \mid B = \text{Quecksilber} \mid B.$$

Damit kann man aus den obigen Zahlen für irgend zwei Metalle die elektromotorische Kraft berechnen. Denn es ist

$$A \mid B = \text{Quecksilber} \mid B - \text{Quecksilber} \mid A.$$

Nehmen wir z. B. als Metall A das Neusilber, als Metall B das Eisen, so ist

$$\begin{aligned} \text{Neusilber} \mid \text{Eisen} &= \text{Quecksilber} \mid \text{Eisen} - \text{Quecksilber} \mid \text{Neusilber} \\ &= \quad 1{,}60 \qquad + 1{,}08 \\ &= +\, 2{,}68 \text{ Millivolt.} \end{aligned}$$

Das positive Zeichen zeigt an, daß der Strom durch die warme Lötstelle vom Neusilber zum Eisen geht.

Die obige Kombination Wismut | Kupfer hat, wie man ebenso berechnen kann, die elektromotorische Kraft 7,42 Millivolt, die Kombination Wismut-Antimon sogar 10,08 Millivolt.

Einige andere Kombinationen, die öfter benutzt werden, haben folgende elektromotorische Kräfte in Millivolt bei 100 ^{0} Temperaturdifferenz:

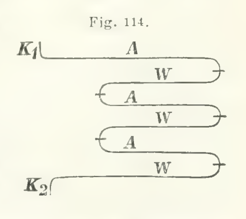
Wismut-Antimon	10,1
Konstantan-Eisen	5,3
Patentnickel-Eisen	4,5
Konstantan-Kupfer	4,0
Konstantan-Silber	3,7
Nickel-Eisen	3,2
Patentnickel-Platin	2,8
Neusilber-Eisen	2,7
Nickel-Kupfer	2,2
Platin-Eisen	1,7
Platinrhodium-Platin	0,8.

Viel stärkere thermoelektrische Kräfte erhält man, wenn man einige Halbmetalle wie Tellur und Selen oder Schwefelmetalle untereinander oder mit Kupfer in thermoelektrische Berührung bringt. Nimmt man z. B. Kupferkies und lötet ihn mit Kupfer zusammen und bringt die eine Lötstelle auf 100 ^{0}, die andere auf 0 ^{0}, so hat dieses Thermoelement eine elektromotorische Kraft von 66,6 Millivolt, bei einer Temperaturdifferenz von 150 ^{0} gar von 100 Millivolt. Ebenso hat z. B. das Thermoelement Kupferkies—Schwefelkies eine elektromotorische Kraft von 166,6 Millivolt. Zu wirksamen Thermoelementen sind diese Kombinationen aber bisher nicht benutzt.

Die elektromotorischen Kräfte von Thermoelementen werden um so größer, je größer der Temperaturunterschied der Lötstellen ist, solange eben die Struktur der Metalle nicht selbst merklich geändert ist. Oft aber wird bei hohen Temperaturen die Struktur der Metalle so geändert, daß, wenn die eine Lötstelle auf sehr hohe Temperatur gebracht wird, während die andere etwa Zimmertemperatur hat, die elektromotorische Kraft nicht nur nicht zu-, sondern im Gegenteil abnimmt, so daß sie bei vielen Kombinationen sogar bei gewissen Temperaturen ganz verschwindet. Bei noch höheren Temperaturen tritt zwar wieder eine elektromotorische Kraft auf, aber der Strom fließt dann durch das Thermoelement in umgekehrter Richtung.

Um daher einigermaßen hohe elektromotorische Kräfte zu bekommen, muß man ganz ebenso wie bei galvanischen Elementen mehrere Thermoelemente hintereinander verbinden und immer die gleichliegenden Lötstellen derselben erwärmen. Man erhält so eine thermoelektrische Säule oder Thermosäule.

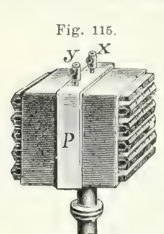
Fig. 114.



In Fig. 114 ist eine solche Kombination mehrerer Thermoelemente schematisch gezeichnet. Eine Reihe von Antimonstäben A sind an eine Reihe von Wismutstäben W angelötet, so daß immer ein Wismutstab zwischen zwei Antimonstäben liegt. Wenn man nun die gleichliegenden Lötstellen (z. B. rechts) erwärmt, so fließt durch die warmen Lötstellen immer der Strom vom Wismut zum Antimon und die elektromotorischen Kräfte von den einzelnen Lötstellen addieren sich, so daß die in der Figur schematisch dargestellte Kombination eine dreifach so große elektromotorische Kraft hat als ein einzelnes solches Thermoelement. Die freien

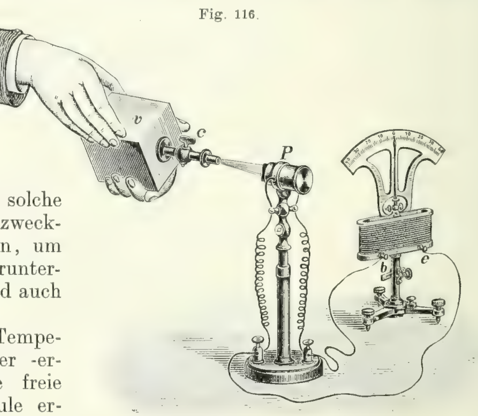
Enden dieser Säule K_1 und K_2 werden natürlich durch einen beliebigen äußeren Schließungsdraht verbunden. In Fig. 115 ist die Ansicht einer solchen Thermosäule gegeben, bei welcher eine große Menge von Antimon- und Wismutstäbchen aneinander gelötet sind, so daß ihre gleichliegenden Lötstellen alle auf der einen Seite sich befinden und zugleich erwärmt oder abgekühlt werden. Die freien Enden des ersten und letzten Stabes gehen in die Klemmschrauben x und y und können dort durch ein Galvanometer verbunden werden, durch das also dann der Strom von der Thermosäule fließt.

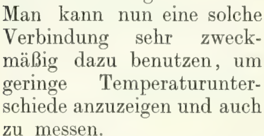
Fig. 115.



Bei geringen Temperaturdifferenzen ist die elektromotorische Kraft einer Thermosäule, wie oben erwähnt, diesem Unterschied der Temperaturen proportional. Hat man eine Thermosäule mit einem Galvanoskop verbunden, so wird also immer, wenn die eine Seite der Thermosäule erwärmt oder abgekühlt wird, ein Strom durch die Windungen des Galvanoskops gehen und die Nadel desselben ablenken. In Fig. 116 ist eine solche Verbindung, wie sie häufig benutzt wird, gezeichnet. Man sieht eine Thermosäule P, bei der die eine Reihe von entsprechenden Lötstellen frei ist, damit man sie beliebig erwärmen und abkühlen kann, während die andere durch eine Messinghülse gedeckt ist. Von den Enden der Thermosäule gehen Drähte zu dem Galvanoskop, dessen Nadel die Ströme anzeigt.

Fig. 116.





Man kann nun eine solche Verbindung sehr zweckmäßig dazu benutzen, um geringe Temperaturunterschiede anzuzeigen und auch zu messen.

Die geringste Temperaturerniedrigung oder -erhöhung, welche die freie Seite der Thermosäule erleidet, erzeugt einen Strom, der die Nadel des Galvanometers zum Ausschlag bringt. Wenn man z. B. aus dem Gefäße v, das komprimierte Luft enthält, durch Öffnung des Hahnes c die Luft ausströmen läßt, so wird die ausströmende Luft etwas kälter sein als die umgebende. Trifft diese die freie Seite der Thermosäule P, so wird diese abgekühlt, es entsteht ein Thermostrom nach einer bestimmten Richtung, und die Nadel des Galvanoskops wird abgelenkt und zeigt dadurch die Abkühlung an. Je empfindlicher das Galvanometer ist, das mit der Thermosäule verbunden ist, um so geringere Temperaturdifferenzen kann man so noch nachweisen.

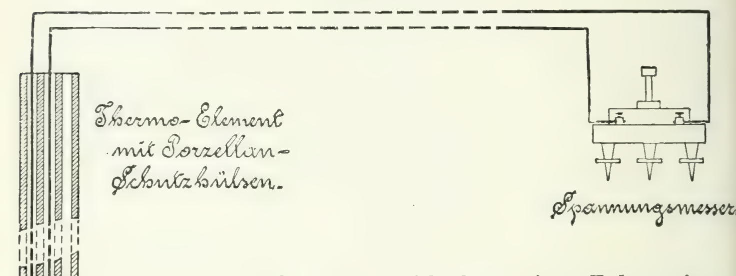
Will man die Temperatur an einem Punkte allein bestimmen, so kann man nicht eine solche Thermosäule mit ausgedehnter Fläche anwenden, sondern man nimmt dann ein einzelnes Thermoelement, dem man eine zweckmäßige Form dafür gegeben hat. Sehr bequem ist dazu die thermoelektrische Nadel (Fig. 117), bei der die zur Untersuchung dienende Lötstelle der beiden Metalle, z. B. Neusilber und Eisen, die Form einer Spitze hat, mit der man in die zu prüfende Stelle, z. B. einer Wurzel oder einer Rinde, hineinsticht.

Die Thermoelemente haben allmählich eine ausgedehnte Verwendung erhalten, um sehr hohe und sehr tiefe Temperaturen zu messen, für welche die gewöhnlichen Quecksilberthermometer, die nur bis etwa 350° nach oben und etwa — 30° nach unten brauchbar sind, nicht mehr ausreichen. Man nennt Apparate, die zur Messung sehr hoher Temperaturen dienen, wie sie etwa in Öfen, in Flammen, in Schmelztiegeln u. s. w. herrschen, Pyrometer. Als besonders brauchbar und unveränderlich hat sich die Kombination von Platin und Platinrhodium (10 % Rhodium, 90 % Platin) erwiesen, welche von Le Chatelier für solche Messungen zuerst angewendet wurde. Diese thermoelektrischen Pyrometer bestehen also aus einem Draht aus chemisch reinem Platin und einem Draht aus Platinrhodium, die gewöhnlich je 150 cm lang und etwa 0,6 mm dick sind und in eine Armatur aus feuerfestem Material eingezogen sind. Diese Armatur besteht aus mehreren ineinander geschobenen Porzellanrohren, aus sogenannter Marquardtscher Masse, welche sehr feuerbeständig ist. Die Rohre dienen zur Isolierung der beiden Drähte des Elementes voneinander und zur Abhaltung etwaiger Heizgase. Häufig, wenn die Temperatur der Öfen nicht zu hoch ist, schiebt man über sie noch ein Rohr aus Reinnickel oder aus Mannesmannstahl, um sie gegen Beschädigungen zu schützen. Solche Pyrometer werden von Siemens & Halske in Berlin, Hartmann & Braun in Frankfurt a. M. u. a. angefertigt. Das Rohr wird mit seinem unteren Teil, wo sich die Lötstelle befindet, in den Raum, z. B. den Ofen, dessen Temperatur gemessen werden soll, eingeführt. Die Porzellanschutzrohre halten Temperaturen bis zu 1600° C. aus und so weit kann man das Thermoelement zu Messungen benutzen. Die freien Enden des Thermoelements werden an zwei Klemmschrauben, die auf den Schutzrohren angebracht sind, geführt und sind daher 1½ m von dem hoch erhitzten Raume entfernt, so daß ihre Temperatur leicht durch ein gewöhnliches Thermometer bestimmt werden kann. An die Klemmschrauben werden Drähte angeschraubt, die zu einem Galvanometer führen, das beliebig weit von dem Ofen entfernt, etwa in einem anderen Raum stehen kann. Wenn man dem Galvanometer einen so hohen Widerstand gibt, daß der Widerstand der Verbindungsdrähte dagegen nicht in Betracht kommt, so kann man das Galvanometer gleich so eichen, daß man direkt die Grade Celsius abliest; denn jeder bestimmten Temperatur entspricht eine bestimmte Ablenkung der Galvanometernadel und umgekehrt. Eine Einrichtung zu solchen pyrometrischen Messungen ist in Fig. 118 gezeichnet. Das Thermoelement links mit seinen Schutzhüllen ist etwa in einen Ofen

Fig. 117.

eingeführt und Verbindungsdrähte führen zu dem Spannungsmesser rechts. Als solches ist hier eines der Präzisionsinstrumente von Siemens & Halske (S. 78) angewendet, bei welchem nur, um die Empfindlichkeit zu erhöhen, die bewegliche Spule nicht um eine feste Achse sich

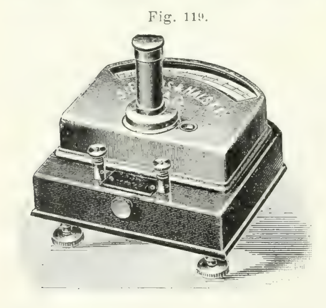
Fig. 118.



dreht, sondern vielmehr an einem Faden aufgehängt ist. Dieser Faden ist in dem schornsteinartigen Aufsatz angebracht, den man in der besonderen Zeichnung Fig. 119 des Spannungsmessers sieht.

Um tiefe Temperaturen, wie man sie jetzt leicht durch flüssige Luft erzeugt, und die etwa bis —190° C. gehen, messen zu können, wendet man ebenfalls Thermoelemente in Verbindung mit einem Galvanometer an. Für diese Temperaturen eignet sich als Thermoelement die Kombination Kupfer-Konstantan (auch Silber-Konstantan oder Eisen-Konstantan). Erst durch die Benutzung solcher Thermoelemente ist die Messung sehr hoher und sehr tiefer Temperaturen überhaupt bequem und genau ausführbar geworden.

Fig. 119.

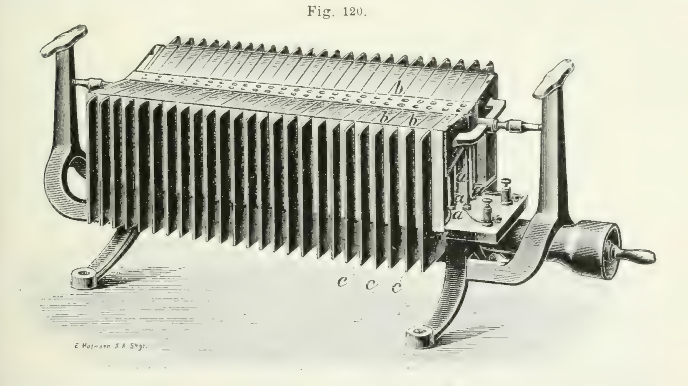


Man hat sich häufig bemüht, Thermosäulen von großer Wirksamkeit zu bauen, d. h. Thermosäulen, welche hohe elektromotorische Kraft mit geringem inneren Widerstand verbinden und dabei haltbar sind. Diese sollten durch Gas oder Kohlenfeuer geheizt werden und dadurch bequem brauchbare Stromerzeuger von verhältnismäßig großer Wirksamkeit geben. Indes ist dieses Problem doch nur in kleinem Maßstab gelöst. Von Gülcher wurde eine bequeme und recht haltbare und praktische Thermosäule konstruiert, welche mit Gas heizbar ist und welche eine elektromotorische Kraft von 4 Volt liefert. Diese Säule ist in Fig. 120 abgebildet. Sie besteht aus 66 hintereinander geschalteten Elementen, welche aus Nickel und einer antimonhaltigen

Legierung gebildet sind. Das Nickel ist in Form von Röhrchen a, a angewendet, welche zugleich als Gaszuleitungsröhren dienen und innen im Apparat auf einer Platte stehen. Am oberen Ende ist an jedes Röhrchen ein Verbindungsstück aufgelötet, welches nach oben in eine Hülse ausläuft, in welche die antimonhaltige Legierung eingegossen ist. Diese Antimonelektroden sind winkelförmig gebogen b, b und an ihre Enden sind lange Kupferstreifen c, c angelötet, welche zur Abkühlung und zur Verbindung der Elemente dienen. In die oben sichtbaren Löcher werden kleine Schornsteine aus Asbest durch Glimmerröhrchen aufgesetzt. Es ist die Einrichtung so getroffen, daß selbst bei wechselndem Gasdruck die Säule immer konstant erwärmt wird. Der innere Widerstand dieser Säule ist 0,65 Ohm. Sie kann also bei K u r z s c h l i e ß u n g (S. 68) einen Maximalstrom von $\frac{4}{0,65} = 6$ Ampere geben und ist stets durch Anzünden des Gases zum Betrieb bereit und erfordert nur verhältnismäßig wenig Gas (170 l per Stunde).

In den Thermoelementen findet eine direkte Umwandlung von Wärme in Elektrizität statt. Indem nämlich durch die künstliche Erwärmung der

Fig. 120.



einen Lötstelle ein Strom durch sie von dem einen Metall zum anderen fließt, wird an dieser Lötstelle selbst Peltiersche Wärme erzeugt und zwar negative, also Abkühlung. Die wärmere Lötstelle würde sich also von selbst abkühlen, infolge des erzeugten Stromes, wenn ihr nicht immer von neuem Wärme zugeführt würde. Ebenso muß sich die andere, kältere Lötstelle wegen der dort positiven Peltierschen Wärme von selbst erwärmen, wenn man nicht, etwa durch Eis oder fließendes Wasser, die erzeugte Wärme fortführt. Ein Thermoelement, das einen Strom liefert, verhält sich also ganz wie eine arbeitende Dampfmaschine. Bei dieser arbeitet der Dampf, indem er sich abwechselnd bei hohen Temperaturen entwickelt und bei tiefen Temperaturen kondensiert wird. Für seine Erzeugung verbraucht er Wärme und diese wird ihm von dem heißen Kessel geliefert, während er bei der Kondensation Wärme erzeugt und diese wird ihm durch das

Kondenswasser entzogen. Es wird also bei dem Thermoelement wie bei der Dampfmaschine an der einen Stelle Wärme zugeführt, an der anderen Wärme entzogen, und die Differenz dieser Wärmemengen verwandelt sich bei der Dampfmaschine in mechanische Arbeit, bei dem Thermoelement in elektrischen Strom. Da die Wärme ein so mächtiges Agens in der Natur ist, da sie die Energie für unsere größten Maschinen liefert, so sollte man glauben, daß man durch Umwandlung von Wärme in Elektrizität auch sehr mächtige elektrische Wirkungen bekommen kann. Das ist aber bisher nicht der Fall. Der Nutzeffekt der Thermoelemente, d. h. das Verhältnis der erzeugten elektrischen Energie zu der aufgewendeten Wärmemenge, ist ein sehr geringer. Das eigentliche Problem, Wärme direkt und ökonomisch in Elektrizität umzuwandeln, dieses Problem, das von der allergrößten Wichtigkeit sowohl in wissenschaftlicher wie in praktischer Hinsicht wäre, ist bisher nicht gelöst.

---

6. Kapitel.

Die chemischen Wirkungen des elektrischen Stromes. Elektrolyse. Polarisationsströme.

Vielseitiger als alle anderen Naturkräfte steht die Elektrizität mit allen in Verbindung. Ebenso leicht wie der elektrische Strom Licht- und Wärmewirkungen hervorbringt, ebenso leicht bringt er auch chemische Wirkungen hervor, Wirkungen, die sowohl für die wissenschaftliche Untersuchung der Elektrizität, als für die praktische Benutzung derselben von der größten Wichtigkeit geworden sind.

Die Leiter des elektrischen Stromes sind, wie wir wissen, von zweierlei Art, Leiter erster und zweiter Klasse. Zu der ersten Klasse gehören alle Metalle, Kohle, Selen und eine Reihe von anderen nicht direkt metallischen Körpern. Zu den Leitern zweiter Klasse gehören alle zusammengesetzten Flüssigkeiten, die den Strom überhaupt leiten. Wenn nun der elektrische Strom durch eine solche leitende zusammengesetzte Flüssigkeit hindurchgeht, so verursacht er immer eine chemische Zersetzung dieser Flüssigkeit, eine chemische Zersetzung, die nach ganz bestimmten Gesetzen vor sich geht. Man nennt die Leiter zweiter Klasse deshalb auch gewöhnlich Elektrolyte, weil sie durch Elektrizität zersetzt werden (von λύειν, lyein, lösen, zersetzen). Den Vorgang der Zersetzung nennt man Elektrolyse. Wir haben schon früher das Wort Elektroden oft benutzt, um die Enden der stromzuführenden Leiter zu bezeichnen. Gerade bei der Elektrolyse wurde diese Bezeichnung zuerst von Faraday eingeführt. Will man nämlich den elektrischen Strom von einer Stromquelle aus durch eine Flüssigkeit gehen lassen, so muß man in diese Flüssigkeit zwei Platten oder Drähte aus Metall eintauchen, von denen die eine Platte mit dem positiven, die andere mit dem negativen Pol der Stromquelle (Batterie) in Verbindung ist. Diese Platten oder Drähte nennt man speziell die Elektroden (von ὁδός, hodos, Weg, Bahn). Zur Unterscheidung nennt man die mit dem negativen Pol (Zinkpol) der Batterie verbundene Elektrode die Kathode, die mit dem positiven Pol verbundene die Anode (das eine von κατ᾽, kat', weg, das andere von ἀν᾽, an', hin — also wegführende Bahn und hinführende Bahn).

Taucht man zwei Elektroden von gleichem Metall, z. B. zwei Platinelektroden, oder auch von verschiedenem Metall in eine leitende Flüssigkeit und schickt man durch sie einen elektrischen Strom, so wird die Flüssigkeit stets in ihre Bestandteile zerlegt, es findet stets eine Zersetzung der Flüssigkeit statt. Aber diese Zersetzung geht nicht überall in der ganzen Flüssigkeit vor sich, sondern nur an den Elektroden selbst. Taucht man z. B. die beiden Platinplatten in Brunnenwasser und schickt den Strom von 2 oder 3 Bunsenelementen hindurch, so sieht

man an der positiven und an der negativen Platinplatte Gasblasen aufsteigen, und zwar an der positiven Sauerstoff, an der negativen Wasserstoff. Es ist gerade dieser Vorgang im Wasser kein einfacher, wir werden ihn daher erst nachher ausführlicher behandeln.

Leitende Flüssigkeiten sind die Lösungen von Säuren, wie Schwefelsäure, Salzsäure, Salpetersäure, in Wasser und die Lösungen von Salzen in Wasser, ferner auch geschmolzene Salze. Ein jedes Salz, z. B. schwefelsaures Kupfer (Kupfervitriol), enthält als einen Bestandteil ein Metall, hier Kupfer, der andere Bestandteil ist eine Säure oder Sauerstoff oder Chlor u. dergl., hier ist er Schwefelsäure. Läßt man nun eine Salzlösung elektrolysieren, so scheidet sich immer das Metall an der negativen Elektrode ab, der Rest des Salzes erscheint an der positiven Elektrode. Also in unserem Beispiel, wenn man eine Lösung von Kupfervitriol zersetzt, tritt das reine metallische Kupfer an der negativen Elektrode auf, bei Zinkvitriol scheidet sich das Zink, bei salpetersaurem Silber das Silber, bei Goldchlorid das Gold an der negativen Elektrode ab. Man erkennt schon daraus die Wichtigkeit dieser Wirkung des elektrischen Stromes; denn es ist ja dadurch möglich, Metalle aus ihren Salzen in reinem Zustand auszuscheiden, ein Prozeß, der auf andere Weise nur durch große Hilfsmittel, wenn überhaupt, durchzuführen ist. Der andere Bestandteil des Salzes scheidet sich also an der positiven Elektrode ab. Man nennt die beiden Bestandteile eines Elektrolyten, in welche er durch den Strom zerlegt wird, seine Ionen (von ἰόν, i-on, das Wandernde) und bezeichnet auch nach Faradays Vorgang den an der positiven Elektrode (Anode) auftretenden Bestandteil als Anion, den an der negativen (Kathode) auftretenden als Kation. Wir haben daher den ersten Satz:

Bei jeder elektrolytischen Zersetzung scheidet sich das Metall an der Kathode ab.

Zu den Metallen gehört in diesem Satze auch der Wasserstoff, z. B. in der Schwefelsäure SO_4H_2 ist Wasserstoff $2H$ das Kation und der Rest SO_4 das Anion. Dieser allgemein gültige Satz, daß das Anion eines Elektrolyten an der Anode, das Kation an der Kathode frei auftritt, wird jedoch häufig verdeckt, so daß er scheinbar nicht richtig ist.

Es ist nämlich von vornherein einzusehen, daß wenn eine Flüssigkeit in ihre Bestandteile zerlegt wird, diese Bestandteile unter Umständen wieder rein chemisch auf die Flüssigkeit oder auf die Elektroden wirken können. Man erhält deshalb sehr häufig bei der Elektrolyse nicht die wirklichen Produkte der Zersetzung, sondern diejenigen Produkte, die durch die rein chemische Einwirkung der Ionen auf die Flüssigkeit oder die Elektroden entstehen. Die elektrolytisch abgeschiedenen Bestandteile gehen, wie man sagt, sekundäre Prozesse ein. Schickt man z. B. den Strom zwischen Platinelektroden durch eine Lösung von Chlornatrium (Kochsalz) in Wasser, so sollte an der negativen Elektrode Natrium entstehen. Das Natrium aber wirkt im Moment seines Entstehens sofort auf das Wasser zersetzend und bildet Ätznatron und Wasserstoff, während das freie Chlor gasförmig an der positiven Elektrode aufsteigt.

Namentlich der positive Bestandteil, das Anion, welches gewöhnlich eine Säure oder Chlor oder ein anderer sehr reaktionsfähiger Stoff ist,

tritt fast immer in chemische Verbindung mit dem Elektrodenmetall oder mit der Flüssigkeit. Wenn z. B. Zinkvitriol (schwefelsaures Zink) zwischen Kupferelektroden elektrolysiert wird, so tritt an der negativen Elektrode Zink auf, an der positiven Elektrode verbindet sich der entstehende Schwefelsäurerest sofort mit dem Kupfer der Elektrode zu schwefelsaurem Kupfer (Kupfervitriol) und es bildet sich also an der positiven Elektrode Kupfervitriol durch einen sekundären Prozeß. Ein anderes Beispiel: Wenn man eine konzentrierte Lösung von Zinnchlorür ($SnCl_2$) zersetzt, so entsteht an der negativen Elektrode Zinn, an der positiven würde freies Chlor auftreten. Dieses wirkt aber sofort auf das gelöste Salz selbst, auf das Zinnchlorür, und verwandelt dieses in Zinnchlorid, so daß an der positiven Elektrode kein freies Chlor auftritt, sondern Zinnchlorid.

Es kann also der an der positiven Elektrode abgeschiedene Bestandteil eine große Menge von sekundären Prozessen eingehen.

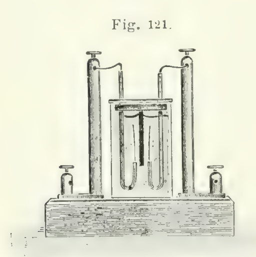
Ebenso kann aber auch das Metall, das an der negativen Elektrode auftritt, sofort wieder in chemische Verbindung mit den anderen vorhandenen Stoffen treten, wenn es überhaupt eine energische chemische Aktionsfähigkeit hat.

So sind namentlich die Alkalimetalle, Kalium und Natrium, chemisch sehr wirksam und daher treten bei ihnen immer sekundäre Prozesse auf, sie wirken zersetzend auf das Wasser der Lösung. Läßt man z. B. eine Lösung von schwefelsaurem Natron (SO_4Na_2) zwischen Platinelektroden zersetzen, so scheidet sich an der negativen Elektrode das Metall, Natrium, ab, dieses zersetzt aber sofort das Wasser der Lösung in Hydroxyl (HO) und Wasserstoff. Das Hydroxyl verbindet sich mit dem Natrium in Wasser zu Natronlauge (NaHO), der Wasserstoff wird frei und tritt an der negativen Elektrode in Form von Blasen auf. Auch an der positiven Elektrode treten hierbei sekundäre Prozesse auf. Das dort sich abscheidende Anion SO_4 bildet mit dem Wasser (H_2O) sofort Schwefelsäure SO_4H_2, während der Sauerstoff des Wassers frei wird und in Form von Blasen an der positiven Elektrode auftritt. Es sollte sich also bei der Elektrolyse von schwefelsaurem Natrium (SO_4Na_2) an der negativen Elektrode Natrium, an der positiven SO_4 bilden. In Wirklichkeit bildet sich aber durch sekundäre Prozesse an der negativen Wasserstoff, an der positiven Sauerstoff. Gerade solche sekundäre Prozesse waren es, welche bei der ersten Entdeckung der Elektrolyse einen großen Irrtum erzeugten. Leitet man nämlich einen elektrischen Strom mittels Platinplatten durch ein Gefäß mit gewöhnlichem Wasser, so entwickelt sich an der negativen Elektrode immer Wasserstoff, an der positiven Sauerstoff. Man glaubte deshalb natürlich zuerst, daß das Wasser durch den Strom direkt in seine Bestandteile, Wasserstoff und Sauerstoff, zerlegt würde. Spätere Untersuchungen haben aber gezeigt, daß das nicht der Fall ist. Ganz reines Wasser, welches von allen Spuren von aufgelösten Salzen befreit ist, leitet den elektrischen Strom nicht, ist ein fast vollkommener Isolator, kann also auch nicht elektrolysiert werden. Wenn das Wasser einigermaßen gut leitet, wie es bei den erwähnten Versuchen über Elektrolyse des Wassers der Fall war, so enthält es immer eine Reihe von Salzen in mehr oder minder großen Quantitäten aufgelöst, namentlich

von Natron- und Kalisalzen. Durch den Strom werden nun diese Salze zersetzt und die Metalle an der negativen Elektrode zersetzen das Wasser, verbinden sich mit dem Hydroxyl und lassen den Wasserstoff frei werden und sich entwickeln. Der Rest der Salze verbindet sich an der positiven Elektrode mit dem Wasserstoff des Wassers und läßt Sauerstoff frei werden. So treten bei dem Durchgang des Stromes durch Wasser allerdings Wasserstoff und Sauerstoff auf, aber nicht durch direkte Elektrolyse, sondern durch sekundäre Prozesse. Dasselbe geschieht, wenn man Wasser mit irgend einer Säure, z. B. Schwefelsäure, ein wenig ansäuert. Dann wird von der Schwefelsäure (SO_4H_2) an der negativen Elektrode Wasserstoff frei, an der positiven Elektrode verbindet sich der Rest SO_4 mit dem Wasserstoff des Wassers und der Sauerstoff tritt frei auf. Oder wenn man Salzsäure ClH dem Wasser zusetzt, so wird das Kation H frei, und das Anion Chlor Cl verbindet sich mit dem Wasserstoff des Wassers zu ClH und der Sauerstoff des Wassers tritt auch hier durch sekundäre Prozesse frei auf.

Man erkennt schon aus dem Gesagten die Vielseitigkeit der Prozesse, welche bei der Elektrolyse direkt oder sekundär auftreten können. Manche dieser Prozesse kann man in sehr auffälliger Weise demonstrieren. Wenn man z. B. wieder die Elektrolyse des Natriumsulfats (Glaubersalzes) Na_2SO_4 zwischen Platinelektroden betrachtet, wie sie in Fig. 121 dargestellt ist, in welcher die beiden Elektroden durch eine Tonwand getrennt sind, so bildet sich in der Flüssigkeit in der Nähe der Kathode Ätznatron (NaOH), die Flüssigkeit reagiert also dort basisch, während sich in der Nähe der Anode Schwefelsäure (SO_4H_2) bildet, die Flüssigkeit reagiert also dort sauer. Färbt man nun die Glaubersalzlösung vorher durch einen Absud von Blaukraut blau, so wird sie in der Nähe der Kathode stark grün, in der Nähe der Anode stark rot gefärbt und bei Umkehrung der Stromrichtung kehren sich auch die Färbungen in der Nähe der beiden Elektroden um. Solche auffallende Färbungen benutzt man praktisch in dem Polreagenzpapier, um sofort den negativen Pol einer Stromquelle feststellen zu können. Es ist dies Fließpapier, welches mit Kaliumsulfat imprägniert ist, dem eine organische Substanz, Phenolphtalein, in kleinen Mengen beigesetzt ist. Feuchtet man das Papier an und setzt zwei Drähte auf dasselbe, die mit den Polen einer Stromquelle verbunden sind, so entsteht sofort unter der Kathode ein roter Fleck, weil das dort auftretende Kalium sich mit dem Phenolphtalein zu einem rot gefärbten Salz verbindet, während an der Anode nichts Sichtbares auftritt. Man weiß dann sofort, welcher Pol der Stromquelle der negative, welcher der positive ist.

Fig. 121.



Woher kommt es nun aber, daß bei der Elektrolyse die freien Bestandteile immer nur an den Elektroden auftreten? Wenn der Strom auf die Flüssigkeit zersetzend wirkt, so muß er doch das in der ganzen Ausdehnung der Flüssigkeit tun, durch welche er geht, und nicht bloß an

den Elektroden, an den Eintritts- und Austrittsstellen? Die Erklärung für diese Erscheinungen bietet die Theorie der Lösungen von Clausius-Arrhenius, welche mit allen aus ihr gezogenen Folgerungen bisher ausnahmslos bestätigt worden ist. Nach dieser Theorie besteht jedes zusammengesetzte Molekül, z. B. Chlornatrium NaCl, aus zwei Bestandteilen, die von vornherein schon und dauernd elektrisch, aber entgegengesetzt elektrisch sind, dem positiven Metall und dem negativen Rest. Das Molekül ist daher unelektrisch. Wenn ein solches Salz in Wasser aufgelöst wird, so darf man aber nicht annehmen, daß in dem Wasser lauter Chlornatrium-(Kochsalz-)Moleküle selbst schwimmen. Vielmehr bringt der Vorgang der Lösung eine weitgehende Dissoziation dieser Moleküle hervor. Die einzelnen Kochsalzmoleküle sind in der Lösung in ihre Atome geteilt, und zwar kann man sich den Grund dieser Dissoziation so vorstellen, daß jedes Molekül in der Flüssigkeit sich rasch und heftig bewegt, dabei an andere Moleküle anstößt und dadurch in seine Bestandteile zertrümmert wird. Diese Atome, die also starke elektrische Ladungen besitzen, sind die Ionen des Moleküls. Es gehen also in der Flüssigkeit fortwährend Trennungen und Wiedervereinigungen dieser Ionen vor sich, jedoch so, daß der Hauptteil aller Moleküle dissoziiert ist. Diese Vorstellung von der Natur einer zersetzbaren Flüssigkeit ist noch ganz unabhängig von den Erscheinungen der Elektrolyse. Wenn nun in eine solche dissoziierte Flüssigkeit zwei Elektrodenplatten hineingestellt werden, von denen die eine positiv elektrisch, die andere negativ elektrisch ist, so wirken die Elektrizitäten dieser Platten anziehend und abstoßend auf die elektrischen Ladungen der Ionen. Die negative Elektrode zieht die positiv geladenen Metallionen an, die positive Elektrode den negativen Rest. Im Inneren der Flüssigkeit findet also eine fortschreitende Bewegung, eine Wanderung aller Kationen nach der einen, aller Anionen nach der anderen Richtung statt. Bei dieser Wanderung sind jedoch im Inneren der Flüssigkeit überall die positiven und negativen Ionen in gleicher Zahl vorhanden. Das Innere der Flüssigkeit bleibt also scheinbar unverändert.

Anders ist es an der Grenze, an den Elektrodenplatten selbst. Dort kommen immerfort an die negative Elektrode positive Metallionen heran. Diese geben nun ihre Ladung an die Elektrode ab und bleiben unelektrisch an ihr haften. Ebenso werden die Anionen an der positiven Elektrode unelektrisch und bleiben an ihr, resp. wenn sie gasförmig sind, gehen sie an ihr in die Luft.

Nach dieser Theorie ist es also nicht der Strom, welcher die Moleküle zersetzt. Vielmehr sind die Moleküle schon zum größten Teil zersetzt und der Strom bringt nur eine bestimmte Bewegung dieser Teilmoleküle, Ionen, hervor.

Obwohl diese Theorie auf den ersten Anblick etwas künstlich erscheint, schließt sie sich doch mit merkwürdiger Präzision allen, selbst den feinsten Erscheinungen, die bei der Untersuchung von zusammengesetzten Flüssigkeiten auftreten, an und hat sich daher allgemeine Anerkennung erworben.

Die genauere quantitative Untersuchung der elektrolytischen Erscheinungen hat sich nun offenbar mit einer Reihe von Fragen zu be-

schäftigen, von denen die erste folgende ist: Wenn eine bestimmte Verbindung, z. B. Chlorsilber, durch den Strom zersetzt wird, wieviel Chlor und wieviel Silber tritt dann gleichzeitig an den Elektroden auf?

Diese Frage und die folgenden sind von dem großen englischen Physiker Faraday beantwortet worden und man nennt die Gesetze der elektrolytischen Erscheinungen deswegen die Faradayschen Gesetze. Die vorhin aufgeworfene erste Frage beantwortet sich nun folgendermaßen: Es ist bekannt, daß die Chemie für jeden Stoff eine gewisse Zahl, das Atomgewicht, gefunden hat, welche in Verbindung mit der chemischen Formel einer Verbindung sofort anzeigt, wieviel Gewichtsteile von jedem der konstituierenden Stoffe in einer Verbindung vorhanden sind.

Wenn z. B. die Chemie für Chlor (Cl) das Atomgewicht 35,5 und für Silber (Ag) das Atomgewicht 107,7 angibt, und wenn sie die Formel für Chlorsilber AgCl schreibt, so heißt das: 1 Atom, also 35,5 Gewichtsteile (g, cg, mg u. s. w.) Chlor verbinden sich mit 1 Atom, also 107,7 Gewichtsteilen (g, cg, mg u. s. w.) Silber zu 143,2 Gewichtsteilen Chlorsilber.

Oder wenn Schwefel (S) das Atomgewicht 32, Sauerstoff (O) das Atomgewicht 16, Kupfer (Cu) das Atomgewicht 63,5 hat, und wenn die Formel für Kupfervitriol geschrieben wird

$$SO_4Cu,$$

so heißt das, daß 32 Gewichtsteile Schwefel mit $4 \times 16 = 64$ Gewichtsteilen Sauerstoff und 63,5 Gewichtsteilen Kupfer sich zu 159,5 Gewichtsteilen Kupfervitriol verbinden.

Bei jeder elektrolytischen Zersetzung treten nun an den Elektroden die Bestandteile gerade in dem Gewichtsverhältnis auf, in dem sie in der zersetzten Verbindung stehen. Wird z. B. Chlorsilber in geschmolzenem Zustand elektrolysiert, so treten an der negativen Elektrode immer 107,7 Gewichtsteile Silber auf, wenn an der positiven 35,5 Gewichtsteile Chlor entstehen; wird Kupfervitriol in Lösung elektrolysiert, so entstehen an der negativen Elektrode 63,5 Gewichtsteile Kupfer, während an der positiven 96 Gewichtsteile SO_4 auftreten. Oder wenn Zinkchlorid elektrolysiert wird, dessen Formel $ZnCl_2$ ist, so treten, da das Atomgewicht des Zinks 65,2, das des Chlors 35,5 ist, an der negativen Elektrode immer 65,2 Gewichtsteile Zink auf, während an der positiven 71 Gewichtsteile Chlor entstehen.

Man erkennt also, daß jede Substanz molekülweise zersetzt wird, d. h. die Gewichtsmengen der abgeschiedenen Ionen stehen in demselben Verhältnis, in dem sie in dem Molekül stehen. Die Gewichtsmengen der Bestandteile in einer Substanz nennt man aber ihre chemischen Äquivalentgewichte. Es folgt also daraus der Satz:

In einer bestimmten Flüssigkeit stehen die Mengen der abgeschiedenen Ionen im Verhältnis ihrer Äquivalentgewichte.

Die chemischen Äquivalentgewichte sind bestimmte Zahlen, welche alle auf Wasserstoff bezogen sind, sie sind nämlich für die Elemente gleich

den Atomgewichten, dividiert durch die Wertigkeit. Das Äquivalentgewicht des Wasserstoffs wird gleich 1 gesetzt.

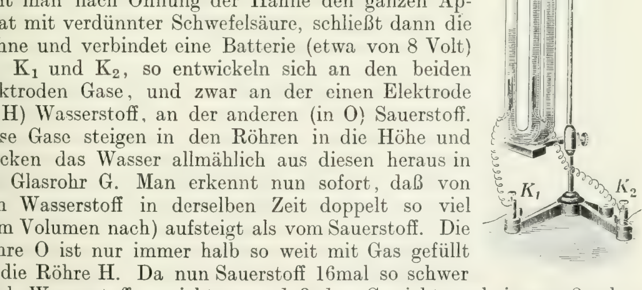
Gehen nun die abgeschiedenen Ionen sekundäre chemische Prozesse mit den Elektroden oder der Flüssigkeit ein, so verbindet sich nach den Gesetzen der Chemie auch wieder jedes von den Ionen immer mit so viel Gewichtsteilen der Elektrode oder der Flüssigkeit, als ihm chemisch äquivalent sind.

Wenn also z. B. schwefelsaures Natron Na_2SO_4 durch den Strom zerlegt wird, so daß an der negativen Elektrode Na_2, d. h. 2×23 Gewichtsteile Natrium entstehen, so zersetzt dieses Natrium die ihm äquivalente Menge von Wasser, bildet 2 (NaOH) und scheidet aus dem Wasser H_2 ab, also gerade so viel Wasserstoff, als dem abgeschiedenen Natrium chemisch äquivalent ist.

Mit anderen Worten: *Wenn Elektrolyse stattfindet, so treten entweder die Bestandteile des Elektrolyten selbst oder die durch chemische Umsetzung erzeugten sekundären Produkte immer in chemisch äquivalenten Mengen auf.*

Man kann dies bei der Zersetzung von Wasser, welche ja durch sekundäre Prozesse vor sich geht und in Wirklichkeit die Zersetzung von sehr verdünnten Lösungen ist, leicht experimentell zeigen. Aus etwas angesäuertem Wasser erhält man, wie erwähnt, durch die Elektrolyse Wasserstoff und Sauerstoff, die beiden Bestandteile des Wassers. Man kann diese beiden Gase, wenn sie sich entwickeln, getrennt auffangen, wenn man jede Elektrode einzeln in ein oben geschlossenes, mit Wasser gefülltes Gefäß bringt, die aber zusammen kommunizieren. Einen solchen Apparat zeigt Fig. 122. Das Glasrohr G teilt sich unten in die beiden graduierten Röhren O und H, die oben durch je einen Hahn verschlossen werden können und in die je eine Platinelektrode eingeschmolzen ist, welche durch Drähte mit den Klemmschrauben K_1 und K_2 verbunden sind. Füllt man nach Öffnung der Hähne den ganzen Apparat mit verdünnter Schwefelsäure, schließt dann die Hähne und verbindet eine Batterie (etwa von 8 Volt) mit K_1 und K_2, so entwickeln sich an den beiden Elektroden Gase, und zwar an der einen Elektrode (in H) Wasserstoff, an der anderen (in O) Sauerstoff. Diese Gase steigen in den Röhren in die Höhe und drücken das Wasser allmählich aus diesen heraus in das Glasrohr G. Man erkennt nun sofort, daß von dem Wasserstoff in derselben Zeit doppelt so viel (dem Volumen nach) aufsteigt als vom Sauerstoff. Die Röhre O ist nur immer halb so weit mit Gas gefüllt als die Röhre H. Da nun Sauerstoff 16mal so schwer ist als Wasserstoff, so sieht man, daß dem Gewicht nach immer 8mal so viel Sauerstoff wie Wasserstoff entwickelt wird, oder immer, wenn 1 g Wasserstoff auftritt, treten 8 g Sauerstoff zugleich auf. Nun sind aber

Fig. 122.



in einem Wassermolekül immer 8 Gewichtsteile (1 Äquivalent) Sauerstoff mit einem Gewichtsteil (1 Äquivalent) Wasserstoff verbunden. Man erkennt also, daß das Wasser durch sekundäre Prozesse so zersetzt wird, daß die Gewichte der auftretenden Ionen im Verhältnis ihrer Äquivalentgewichte stehen.

Die zweite Frage ist nun die: Wenn man einen und denselben Strom der Reihe nach durch verschiedene zersetzbare Flüssigkeiten gehen läßt, in welchem Verhältnis stehen dann die in jeder von diesen Flüssigkeiten zersetzten Mengen zueinander?

Die Antwort auf diese Frage hat Faraday durch eine große Reihe von Versuchen gegeben. Diese Antwort lautet: Durch denselben Strom werden in allen elektrolysierten Flüssigkeiten in derselben Zeit die Bestandteile in demjenigen Mengenverhältnis abgeschieden, welches gleich dem Verhältnis ihrer chemischen Äquivalentgewichte ist.

In der Chemie bezeichnet man als Grammäquivalent einer Substanz diejenige Anzahl Gramme der Substanz, welche gleich dem Äquivalentgewicht ist. Also 1 Grammäquivalent Natrium sind 23 Gramm Na, 1 Grammäquivalent Silber sind 107,7 Gramm Ag, 1 Grammäquivalent Sauerstoff sind 8 Gramm O u. s. w.

Ein Beispiel wird das Faradaysche Gesetz klar machen. Wenn man einen und denselben Strom der Reihe nach durch drei Gefäße mit Flüssigkeiten leitet, so daß er zu gleicher Zeit in den drei Gefäßen (die man Zersetzungszellen nennt) die Flüssigkeiten elektrolysiert, so müssen die abgeschiedenen Mengen der Ionen im Verhältnis ihrer Äquivalentgewichte stehen. Sind diese drei Flüssigkeiten z. B. eine Lösung von Kochsalz (ClNa), eine Lösung von Schwefelsäure (SO_4H_2) und eine Lösung von Zinnchlorür ($SnCl_2$), so wird in der ersten Flüssigkeit in bestimmter Zeit etwa 1 Grammäquivalent Na (23 g) an der negativen und 1 Grammäquivalent Cl (35,5 g) an der positiven Elektrode abgeschieden. In derselben Zeit muß in der zweiten Flüssigkeit die dem Natrium äquivalente Menge Wasserstoff an der Kathode entwickelt werden, also 1 Äquivalent H (1 g, nicht etwa $H_2 = 2$ g), und an der Anode entsteht also die Menge $\frac{1}{2}$ SO_4 (= 48 g), welche dem einen Äquivalent Wasserstoff gleichwertig ist. In der dritten Flüssigkeit endlich entsteht an der positiven Elektrode 1 Grammäquivalent Cl (35,5 g, nicht etwa $Cl_2 = 71$ g) und die äquivalente Menge Zinn, also $\frac{1}{2}$ Sn = 59 g.

Da die Mengen der an jeder Elektrode abgeschiedenen Ionen bei verschiedenen Flüssigkeiten im Verhältnis der Äquivalentgewichte stehen, so steht auch die gesamte Menge der durch Elektrolyse zersetzten Substanzen in allen Flüssigkeiten im Verhältnis der Äquivalentgewichte, es nimmt also in einer bestimmten Zeit, während welcher die Elektrolyse vor sich geht, die Menge des Chlornatriums ab um $35{,}5 + 23 = 58{,}5$ Gewichtsteile, die der Schwefelsäure um $\frac{1}{2}(96 + 2) = 49$ Gewichtsteile und die des Zinnchlorürs um $\frac{1}{2}(118 + 71) = 94{,}5$ Gewichtsteile.

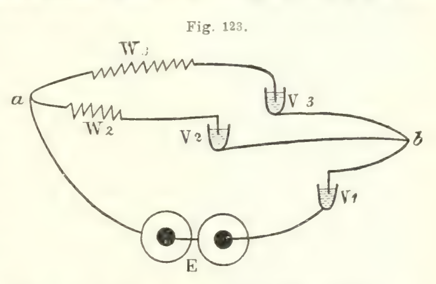
Ein Strom ferner, um ein anderes Beispiel zu nehmen, der aus Wasser in einer bestimmten Zeit 1 g Knallgas entwickelt, scheidet in derselben

Zeit 3,528 g Kupfer aus Kupfervitriol und 11,97 g Silber aus salpetersaurem Silber ab, weil die Zahlen 1 : 3,528 : 11,97 sich wie die Äquivalentzahlen des Knallgases, des Kupfers in Kupfervitriol, des Silbers in salpetersaurem Silber verhalten. Es ist nämlich das Äquivalentgewicht des Knallgases $\frac{1}{2}(H_2 + O) = 9$, das des Kupfers $\frac{1}{2}\,Cu = 31{,}75$, das des Silbers $Ag = 107{,}7$, und diese stehen gerade in dem oben angegebenen Verhältnis. — Diese gesetzmäßigen Beziehungen werden uns sofort neue Mittel für die Messung von elektrischen Strömen gewähren.

Die dritte wichtige Frage ist nun die: Von welchen Verhältnissen des elektrischen Stromes hängt die Menge der abgeschiedenen Substanzen ab? Die Erfahrung hat gezeigt, daß die Menge der abgeschiedenen Ionen erstens abhängt von der Dauer des Stromes, nämlich um so mehr wächst, je länger man den Strom hindurchgehen läßt. Zweitens aber hängt die Menge der in jeder Sekunde elektrolytisch abgeschiedenen Stoffe bei jedem bestimmten Elektrolyten allein ab von der Stromstärke. Dies läßt sich durch Versuche leicht nachweisen.

Wenn man eine Stromverzweigung macht, wie in Fig. 123, und sowohl in den Hauptzweig 1 wie auch in jeden der Zweige 2 und 3 je eine Zersetzungszelle V_1, V_2, V_3 einschaltet, z. B. je einen Platintiegel mit einer Lösung von salpetersaurem Silber, und wenn man ferner noch in die Zweige 2 und 3 beliebige Widerstände W_2 und W_3 einschaltet, so ist ja in jedem der drei Zweige die Stromstärke verschieden und es zeigt sich, daß auch in jeder der drei Zersetzungszellen verschiedene Mengen Silber sich auf der Kathode niederschlagen. Die Stromstärke in 1 ist nun gleich der Summe der Stromstärken in 2 und 3 und man findet auch, daß die Silbermenge, die sich in der Zersetzungszelle V_1 niedergeschlagen hat, gleich der Summe der in V_2 und V_3 erhaltenen Silbermengen ist. Ferner verhalten sich die Stromstärken in 2 und 3 umgekehrt wie die Widerstände dieser Zweige (S. 71) und ebenso findet man auch das Verhältnis der Silbermengen in V_2 und V_3. Man kann diesen Versuch auf verschiedene Weise variieren, immer aber findet man dasselbe Resultat, daß die Menge einer elektrolytisch abgeschiedenen Substanz nur abhängt erstens von der Dauer des Stromdurchgangs und zweitens von der Stärke des Stromes.

Fig. 123.



Man kann den Versuch bequem auch in folgender Form machen. Man schaltet in den Stromkreis einer Batterie, die etwa 6 Volt Spannung besitzt, erstens ein Amperemeter (etwa das von S. 78) und zweitens ein Gefäß mit angesäuertem Wasser ein, in welches Platinplatten als Elektroden tauchen. Fig. 124 zeigt eine zweckmäßige Form eines solchen Ge-

fäßes. Es sind darin c und d die Zuleitungsdrähte, welche zu den Platinplatten führen. Durch den Strom entwickelt sich nun an der einen Elektrode Wasserstoff, an der anderen Sauerstoff, und diese Gase entweichen zusammen durch das gekrümmte Rohr b, welches in den Verschlußkork A des Gefäßes luftdicht eingesteckt ist. Um dieses entweichende Gasgemisch, welches bekanntlich *Knallgas* heißt, aufzufangen, führt das gekrümmte Rohr in eine mit Wasser gefüllte, geteilte Röhre, welche in einer mit Wasser gefüllten Schüssel steht, wie Fig. 125 zeigt. Die Gase steigen aus dem gekrümmten Rohr in die geteilte Röhre und treiben das Wasser aus dieser Röhre hinaus. Die Röhre ist so geteilt, daß der Rauminhalt zwischen je zwei Teilstrichen gleich 1 ccm ist. Man kann also auf ihr sofort ablesen, wie viel Kubikzentimeter Knallgas in der bestimmten Zeit, während welcher man den Strom hat durchgehen lassen, aus dem Zersetzungsapparat entwickelt wurden. Macht man nun diesen Versuch, so findet man bei diesem Strom von 6 Volt Spannung erstens an dem Amperemeter eine bestimmte Zahl von Ampere und zweitens ein bestimmtes Volumen von abgeschiedenem Knallgas, wenn man den Strom z.B. 10 Minuten hat durchgehen lassen und ihn dann unterbrochen hat.

Fig. 124.

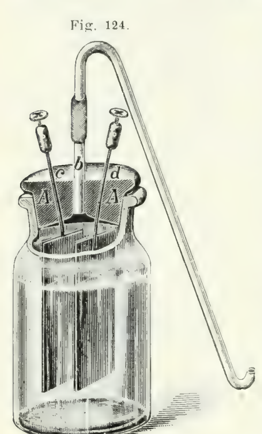


Fig. 125.

Nimmt man aber jetzt statt 6 Volt etwa 20 Volt, schaltet aber außerdem noch so viel Drahtwiderstand ein, bis wieder dieselbe Zahl von Ampere vorhanden ist wie früher, und schließt man den Strom wieder 10 Minuten lang, so findet man, daß jetzt genau ebensoviel Knallgas entwickelt wird wie vorher.

Je größer die Stromstärke ist, desto mehr Knallgas wird in 1 Minute ausgeschieden, je geringer sie ist, um so weniger. *Diese Beziehung kann man auch, und das ist von großer Wichtigkeit, umgekehrt benutzen.* Je mehr Knallgas durch einen Strom in bestimmter Zeit entwickelt wird, desto größer ist die Stärke des Stromes, je weniger entwickelt wird, desto kleiner. Man kann also direkt die abgeschiedene Menge Knallgas als Maß der Stromstärke benutzen. Werden durch einen Strom z. B. in der Minute 5 ccm Knallgas entwickelt, durch einen anderen 10 ccm in der Minute, so beweist uns dies, daß die Stärke des Stromes im zweiten Falle doppelt so groß ist als im ersten Falle.

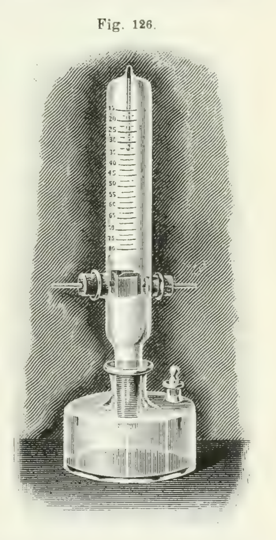
Man nennt die Apparate, welche durch Elektrolyse die Stärke eines Stromes zu messen gestatten, *Voltameter* (nicht zu verwechseln mit

Voltmeter o. S. 99). Den in Fig. 124 und 125 abgebildeten Apparat kann man direkt zur Messung der Stromstärke benutzen, indem die entwickelte Menge Knallgas direkt ein Maß für die Intensität des Stromes ist. Man nennt ihn ein Knallgasvoltameter.

Ein Strom von einer bestimmten Stärke scheidet in jedem Knallgasvoltameter in gleicher Zeit immer die gleiche Menge Knallgas ab.

Man braucht also nur ein für allemal zu bestimmen, wie viel Knallgas unsere Einheit der Stromstärke, 1 Ampere, in 1 Sekunde aus einem Knallgasvoltameter entwickelt, um dann durch eine solche voltametrische Messung jederzeit die Stärke eines beliebigen Stromes in Ampere angeben zu können. Ein Ampere entwickelt nun, wie exakte Versuche lehren, in 1 Sekunde 0,09328 mg Knallgas oder (da das Knallgas als Gas leichter dem Volumen nach gemessen wird) 0,1740 ccm Knallgas bei normalem Druck und normaler Temperatur. In 1 Minute werden also 10,440 ccm Knallgas entwickelt. Man kann danach stets die Stärke eines Stromes in Ampere bestimmen, wenn man nur den Strom zugleich durch ein Knallgasvoltameter gehen läßt und die von dem Strome in 1 Minute abgeschiedene Menge Knallgas (dem Gewichte oder dem Volumen nach) mißt und durch die obige Zahl dividiert.

Fig. 126.



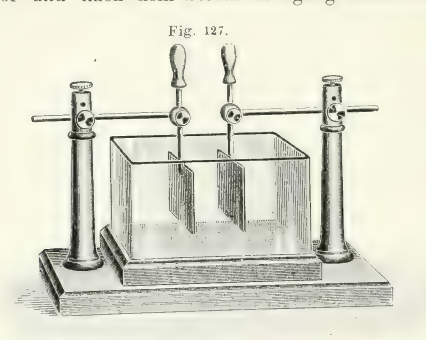
In eine handliche Form hat F. Kohlrausch das Knallgasvoltameter (Wasservoltameter von Hartmann & Braun in Frankfurt a. M.) gebracht. Dasselbe besteht, wie Fig. 126 zeigt, aus einem in Kubikzentimeter geteilten weiten Rohr, welches durch einen Schliff in den Hals eines weiten Gefäßes eingesetzt wird. Gefäß und Rohr werden mit Wasser gefüllt, welches etwa mit Schwefelsäure versetzt ist. In dem Rohr befinden sich zwei Platinelektroden, von denen die eine gabelförmig die andere umfaßt. Die Zuleitungsdrähte gehen durch Kautschukstopfen nach außen. Das entwickelte Knallgas treibt das Wasser aus dem geteilten Rohr heraus und sein Volumen wird dann direkt an der Röhre abgelesen, seine Temperatur an dem in der Röhre befindlichen Thermometer.

Statt aus der Menge des abgeschiedenen Knallgases kann man ebensogut aus der Menge irgend einer anderen elektrolytisch abgeschiedenen Substanz die Stromstärke bestimmen. Praktisch im Gebrauch sind außer dem Knallgasvoltameter noch das Kupfervoltameter und das Silbervoltameter.

Beim Kupfervoltameter (Fig. 127) tauchen zwei Platinplatten in eine (gesättigte) Lösung von schwefelsaurem Kupfer (Kupfervitriol). Läßt man den Strom hindurchgehen, dann scheidet sich auf der negativen Platinelektrode Kupfer ab und aus der Menge des abgeschiedenen

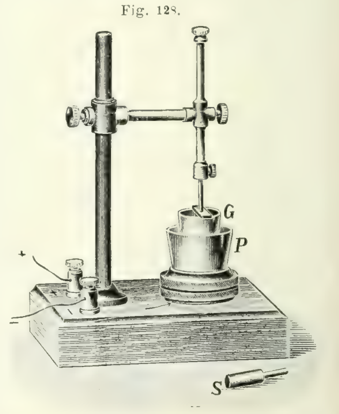
Kupfers, die man durch Wägung der negativen Elektrode (getrocknet) vor und nach dem Stromdurchgang ermittelt, und aus der Dauer des Stromdurchgangs kann man sofort die Stärke des Stromes in Ampere bestimmen. Der Strom 1 Ampere scheidet in 1 Minute 19,69 mg Kupfer ab. Um bei dem Kupfervoltameter genaue Resultate zu bekommen, muß man die Kupfervitriollösung ganz konzentriert nehmen und die beiden Elektroden möglichst groß machen. Man nimmt am besten für jedes Ampere Stromstärke die wirksame Oberfläche jeder Elektrode zu 40 Quadratzentimeter.

Fig. 127.



Für das Silbervoltameter, bei welchem eine Lösung von salpetersaurem Silber angewendet wird, benutzt man gewöhnlich eine Form, welche in Fig. 128 abgebildet ist. Die Lösung von salpetersaurem Silber befindet sich in einem Tiegel P von Platin, welcher auf einem metallischen Boden steht, der mit dem negativen Pol verbunden ist. Dieser Platintiegel dient also gleich als negative Elektrode, an der sich dann das elektrolytisch abgeschiedene Silber ansetzt. Als positive Elektrode wird ein kleiner Zylinder von Silber, wie S, in die Lösung eingetaucht und zwar nicht direkt in P, sondern in ein eingehängtes, mit Löchern zur Kommunikation der Flüssigkeit versehenes Glasnäpfchen G. Bei der Elektrolyse der Lösung scheidet sich also Silber an dem Platintiegel ab, der Rest des Salzes, der Salpetersäurerest, scheidet sich an der positiven Elektrode, dem Silber, ab und verbindet sich mit diesem gleich wieder zu salpetersaurem Silber, welches sich in der Flüssigkeit auflöst. Man hat dadurch den Vorteil, daß die Lösung immer gleichmäßig konzentriert bleibt. Denn gerade so viel Silber, wie sich an den Platintiegel ansetzt, wird nach dem Faradayschen Gesetz von dem Silberstab aufgelöst. Hat man nun den Platintiegel vor dem Versuch trocken gewogen und wägt man ihn, nachdem man den Strom z. B. 10 Minuten lang hat durchgehen lassen, wieder,

Fig. 128.



nachdem er getrocknet ist, so gibt die Gewichtsdifferenz die in 10 Minuten abgeschiedene Menge Silber. (Das Glasgefäß dient dazu, um etwa von dem Silberzylinder abfallende Teile aufzunehmen.) Nun scheidet ein Strom von der Stärke 1 Ampere in 1 Minute 67,10 mg Silber ab. Man hat also aus der Gewichtsdifferenz des Platintiegels sofort die Stromstärke in Ampere.

Die Vorgänge in einem Elektrolyten, wenn ein Strom durch denselben hindurchfließt, lassen sich nach den oben dargestellten Erfahrungstatsachen in sehr einfacher Weise auffassen. Immer, wenn ein Strom durch einen Elektrolyten geht, findet eine Abscheidung der Ionen an den Elektroden statt, d. h. nach der oben angeführten Theorie von Clausius-Arrhenius: es wandern dabei zugleich die positiven Ionen alle nach der Richtung der Kathode und die negativen Ionen nach der Richtung der Anode. Der Durchgang des Stromes durch einen Elektrolyten ist also stets verbunden mit einer Bewegung der körperlichen Teile des Elektrolyten, der Ionen. Diese Ionen sind aber selbst elektrisch, und zwar die Metallionen positiv, die Restionen negativ elektrisch. Es liegt daher nahe, anzunehmen, daß es nur die Bewegungen dieser Ladungen der Ionen selbst sind, welche den Strom in dem Elektrolyten bilden. Sobald die beiden Elektroden mit den Polen eines Elements in Verbindung gesetzt werden, fangen die Ionen in der Flüssigkeit an zu wandern. Die positiv elektrischen Ionen (die Metallionen) wandern nach der Kathode hin und jedes an der Kathode ankommende Ion gibt seine positive Ladung an die negativ geladene Kathode ab und wird unelektrisch und scheidet sich ab. Sofort aber kommen immer wieder neue positive Ionen an und transportieren also immer wieder neue positive Elektrizität nach der Kathode hin. Zu gleicher Zeit wandern die negativen Ionen nach der Anode hin und geben dort ihre Elektrizität ab und werden also selbst unelektrisch. Der Strom in einem Elektrolyten besteht also nach dieser Auffassung in der Wanderung der positiven Ionen nach der Kathode und der negativen Ionen nach der Anode, er ist nicht bloß mit einer solchen Doppelbewegung der geladenen Ionen verbunden, sondern er besteht in dieser Doppelbewegung.

Nun sagt aber das Faradaysche Gesetz aus, daß die Ionen in allen Flüssigkeiten immer in äquivalenten Mengen abgeschieden werden. Daher müssen sie sich auch in äquivalenten Mengen an der Stromleitung beteiligen. Das heißt mit anderen Worten: das Äquivalentgewicht eines beliebigen Ions muß dieselbe Elektrizitätsmenge mit sich transportieren, wie das Äquivalentgewicht eines anderen Ions. Also wenn 1 g Wasserstoff eine gewisse Menge positiver Elektrizität (eine gewisse Anzahl Coulomb) stets mit sich führt, so müssen 23 g Natrium, 39 g Kalium, 31,6 g Kupfer, 107,7 g Silber dieselbe Anzahl Coulomb stets mit sich führen, und ebenso müssen 8 g Sauerstoff, 48 g SO_4, 62 g NO_3 dieselbe Anzahl negativer Coulomb mit sich führen. Also folgt aus dem Faradayschen Gesetz:

Die Äquivalentgewichte der verschiedenen Ionen führen alle die gleiche Anzahl Coulomb mit sich und zwar positive, wenn sie Kationen, negative, wenn sie Anionen sind.

Es sieht also so aus, als ob jedes körperliche Atom mit einer gewissen positiven oder negativen Elektrizitätsmenge fest verbunden wäre, so daß jedes Äquivalent immer dieselbe Menge Elektrizität besitzt. Diese Folgerung erlaubt einen überraschenden Schluß auf die Natur der Elektrizität. Sie zeigt, daß ebenso wie die gewöhnliche Materie aus getrennten, diskreten Teilen, eben den Atomen, sich zusammensetzt, daß so auch die Elektrizität aus atomartigen Teilen besteht, daß die Elektrizität, und zwar sowohl die positive wie die negative Elektrizität, ein Stoff ist, welcher, wie die anderen Stoffe in der Natur, nicht kontinuierlich (zusammenhängend) ist, sondern aus getrennten (diskreten) Atomen besteht. Diese Atome der Elektrizität, die wir Elektronen nennen, haben wir schon im ersten Kapitel provisorisch angenommen, um die dort behandelten Erscheinungen zu erklären. Bei den elektrolytischen Erscheinungen finden wir nun, daß die Ladungen, also die Elektronen, immer mit der körperlichen Materie verbunden sind. Ein Ion eines Körpers werden wir danach aufzufassen haben als die (chemische) Verbindung eines Atoms des betreffenden Körpers und eines Elektrons. Ein Silberion und ein Chlorsilbermolekül sind danach Körper von derselben Konstitution. Ein Chlorsilbermolekül ist = 1 Atom Silber + 1 Atom Chlor und ein Silberion ist = 1 Atom Silber + 1 Atom positive Elektrizität. Ebenso wie die Moleküle eines Körpers gesättigte Anziehungen besitzen und daher nicht mehr chemisch reagieren, während die Atome ungesättigte Gebilde sind und starke Anziehungen ausüben, also auch stark chemisch reagieren, ebenso sind auch die Ionen gesättigte Körper, welche keine chemischen Reaktionen ausüben, sie verhalten sich, im Gegensatz zu den Atomen, wie Moleküle. Auf diese Weise kann man auch die Arrheniussche Theorie der Dissoziation von Salzen in Wasser verstehen. Wenn ein Chlornatriummolekül sich im Wasser in ein Chloratom und ein Natriumatom zerlegen würde, so müßte unbedingt das Natriumatom energisch auf das Wasser reagieren und könnte nicht unverändert im Wasser schwimmen. Aber das Chlornatriummolekül zerlegt sich eben nicht in Atome, sondern in Ionen. Die Atome Chlor und Natrium verbinden sich entweder direkt mit den Elektronen des Wassers, oder sie sind schon von selbst durch Elektronen verbunden und behalten diese bei der Dissoziation, jedenfalls sind im Wasser die Ionen und nicht die Atome vorhanden und die Ionen können als gesättigte Körper so lange bestehen, bis stärkere Anziehungskräfte sie zerreißen.

Wir können nun sogar berechnen, wieviel Coulomb mit jedem Grammäquivalent einer Substanz verbunden sind. Zu dem Zweck erinnern wir uns, daß wenn der Strom 1 Ampere während 1 Sekunde durch einen Stromkreis fließt, daß dann gerade 1 Coulomb positive Elektrizität in der Richtung des Stromes durch den Stromkreis geht (S. 61). Nun scheidet der Strom 1 Ampere nach S. 141 in 1 Minute 67,10 mg, also in 1 Sekunde 0,0011183 g Silber und die äquivalente Menge NO_3 (0,0006440 g) aus salpetersaurem Silber ab. Nach der obigen Darlegung besteht nun dieser Strom in dem Elektrolyten darin, daß 1 Coulomb positiver Elektrizität mit dem Silber nach der Kathode (und zugleich 1 Coulomb negativer Elektrizität mit NO_3 nach der Anode) wandert. Folglich sind unsere 0,0011183 g Silber mit 1 Coulomb fest verbunden, also ist 1 Grammäquivalent Silber (107,7 g) verbunden mit

$$\frac{107{,}7}{0{,}0011183} = 96\,540 \text{ Coulomb.}$$

Ebensoviel Coulomb führt 1 Grammäquivalent jedes anderen Ions mit sich. Wir haben also den Satz:

Ein Grammäquivalent eines jeden Ions ist mit 96540 Coulomb (positiven oder negativen) verbunden.

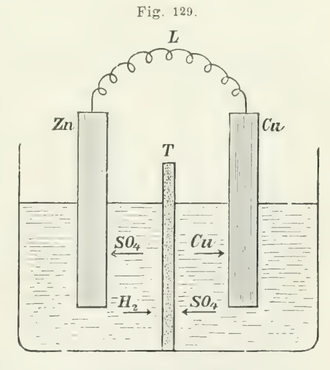
Da bei der Zersetzung eines jeden Grammäquivalents einer Substanz die beiden Ionen entstehen, so gehen bei jeder elektrolytischen Zersetzung pro Grammäquivalent der zersetzten Substanz 96540 positive und negative Coulomb durch die Flüssigkeit.

Die Elektrizitätsmenge 96540 Coulomb ist also mit jedem Grammäquivalent einer Substanz verbunden. Da der Wasserstoff das Äquivalentgewicht 1 hat, so sind also auch mit 1 g Wasserstoff diese 96 540 Coulomb verbunden. Nun hat man aus der Theorie der Gase berechnen können, daß in 1 g Wasserstoff 618 Tausend Trillionen ($618 \cdot 10^{21}$) Wasserstoffatome enthalten sind. Nach unserer jetzigen Vorstellung müssen wir richtiger sagen, es sind so viel Wasserstoffionen vorhanden, da jedes Atom eben mit einer Ladung, mit einem Elektron verbunden ist. Daher können wir berechnen, wie groß die Ladung eines Elektrons ist. Es haben nämlich 618 Tausend Trillionen Elektronen zusammen die Ladung von 96 540 Coulomb, also enthält ein jedes Elektron eine außerordentlich kleine Ladung, nämlich rund $\frac{1}{6 \text{ Trillionen}}$ Coulomb.

Diese Elektrizitätsmenge nennt man das elektrische Elementarquantum. Sie ist nach den jetzigen Vorstellungen der Elektronentheorie die kleinste überhaupt mögliche Elektrizitätsmenge.

Aus der allgemeinen Tatsache, daß immer, wenn ein elektrischer Strom durch eine zersetzbare Flüssigkeit fließt, Zersetzung, Elektrolyse, stattfindet, folgt, daß auch in einem geschlossenen galvanischen Element selbst, das ja auch von seinem eigenen Strom durchflossen wird, elektrolytische Zersetzung der Flüssigkeiten eintreten muß, und daß diese Zersetzung auch genau nach dem Faradayschen Gesetz vor sich gehen muß. Und das ist in der Tat der Fall. Wird z. B. ein Daniellsches Element geschlossen, so daß es von einem Strom durchflossen wird, so werden die beiden Flüssigkeiten zersetzt. In Fig. 129 steht als Schema eines Daniellschen Elementes ein Zinkstab (Zn) in Schwefelsäure (SO_4H_2) und ein Kupferstab Cu in Kupfervitriol ($CuSO_4$). Die beiden Flüssigkeiten sind durch eine Tonplatte T getrennt. Das Kupfervitriol wird zerlegt in Kupfer (Cu) und SO_4, welches

Fig. 129.



nicht frei bestehen kann. Die verdünnte Schwefelsäure wird zerlegt in Wasserstoff (H_2) und SO_4. In dem Element selbst ist nun Kupfer die negative Elektrode, denn der positive Strom fließt ja innerhalb des Elementes vom Zink zum Kupfer. Es wandern infolgedessen Cu und H_2 nach rechts, zum Kupfer hin, die beiden SO_4 nach links, zum Zink hin. Zunächst tritt daher das aus dem Kupfervitriol abgeschiedene Kupfer an die Kupferelektrode heran und diese bedeckt sich während der Dauer des Stromes mit einer glänzenden Schicht von reinem metallischen Kupfer. Dem SO_4 aus dem Kupfervitriol aber kommt von der elektrolysierten Schwefelsäure freier Wasserstoff H_2 entgegen und diese beiden Komponenten verbinden sich wieder zu Schwefelsäure H_2SO_4. Der andere Bestandteil der elektrolysierten Schwefelsäure, SO_4, geht zum Zink, welches in dem Element ja positive Elektrode ist, und verbindet sich mit diesem sofort zu schwefelsaurem Zink (Zinkvitriol SO_4Zn). Alle diese Trennungen und Vereinigungen gehen nach dem Faradayschen Gesetz in äquivalenten Mengen vor sich. Das Resultat dieser chemischen Vorgänge in der Kette ist also das, daß fortwährend Zink sich in Zinkvitriol umwandelt und zu gleicher Zeit eine äquivalente Menge Kupfer sich an der Kupferelektrode niederschlägt. Aber man sieht, daß sich bei diesem Prozeß auch die Flüssigkeiten selbst fortwährend ändern müssen, daß sie nicht immer dieselbe Zusammensetzung behalten. Denn aus der Kupfervitriollösung wird ja fortwährend Kupfer ausgeschieden und dafür Schwefelsäure frisch gebildet. Diese Lösung wird also immer verdünnter an Kupfervitriol, wenn man nicht dafür sorgt, daß immer neue Kupfervitriolkristalle vorhanden sind, die sich auflösen können. Und die Flüssigkeit um das Zink herum, die zunächst aus verdünnter Schwefelsäure allein bestand, reichert sich allmählich immer mehr mit Zinksulfat an, verändert sich also auch.

Wenn sich Zink in Schwefelsäure auflöst (Zinksulfat bildet), so entsteht, wie die Thermochemie lehrt, immer eine gewisse Wärmemenge, bei dem Ausfällen von Kupfer aus Kupfervitriol wird dagegen eine andere, und zwar viel kleinere Wärmemenge verbraucht. Die chemischen Vorgänge in der Kette lassen also eine gewisse Wärmemenge frei werden. Diese Wärmemenge nun bleibt nicht frei im Element, sie dient nicht dazu, die Temperatur des Elements zu erhöhen, sondern die Energie dieser Wärmemenge verwandelt sich eben (wenigstens zum Teil) in elektrische Energie und dient dazu, den elektrischen Strom zu unterhalten. Man kann daher auch direkt sagen, wenn in einem Element ein elektrischer Strom erzeugt und unterhalten wird, so wird die Energie, die Arbeitsmenge, die der Strom enthält, geliefert auf Kosten der Wärme, welche durch die chemischen Prozesse in der Kette frei wird.

Dies können wir auch näher quantitativ verfolgen. Für jedes Grammäquivalent Zink, welches in Lösung geht, wird 1 Grammäquivalent Kupfer niedergeschlagen und zugleich gehen nach dem Obigen 96 540 positive Coulomb durch die Lösung und den Stromkreis von der positiven Elektrode zur negativen. Die Arbeit, die die elektrischen Kräfte dabei leisten, um diese Anzahl von Coulomb von der höheren Spannung zu der niederen zu treiben, ist

elektromotorische Kraft (in Volt) $\times$ Elektrizitätsmenge (in Coulomb)
(Benennung Volt-Coulomb)

also in unserem Falle gleich

elektromotorische Kraft $\times$ 96 540 (Volt-Coulomb).

Die chemischen Prozesse sind also mit einer solchen elektrischen Arbeitsleistung verbunden. Durch die chemischen Prozesse aber wird andererseits eine gewisse Wärmemenge entwickelt. Es wird nämlich bei der Auflösung von 1 Grammäquivalent Zink in Schwefelsäure, wie die Thermochemie lehrt, eine Wärmemenge von 53 045 Einheiten (Grammkalorieen) frei, bei der Abscheidung von Kupfer aus Kupfersulfat werden dagegen pro Äquivalent 27 980 Kalorieen verbraucht. Im ganzen werden also 25 065 Kalorieen bei dem Prozeß in der Kette frei. Es ist nun nicht notwendig, daß sich diese frei werdende Wärmemenge in der Kette g a n z in elektrische Energie verwandelt. Es könnte noch ein Teil der Wärme dazu verwendet werden, die Temperatur des Elements zu erhöhen. Wenn aber, was in einzelnen Fällen tatsächlich geschieht, diese thermochemische Wärmemenge sich ganz in elektrische Energie umsetzt, so können wir sofort berechnen, wie groß die elektromotorische Kraft unseres Elements (des Daniells) in Volt sein muß. Es ist nämlich (nach S. 16) 1 Volt-Coulomb $= \frac{1}{9,81}$ Kilogrammeter, und es ist andererseits, wie die mechanische Wärmetheorie zeigt, eine Grammkalorie gleich 0,426 Kilogrammeter. Also ist einerseits

die frei werdende Wärmemenge $= 25065 \times 0,426$ Kilogrammeter,

andererseits ist die geleistete elektrische Arbeit

$$= \frac{96\,540 \times \text{elektromotorische Kraft}}{9,81} \text{ Kilogrammeter.}$$

Da unter der ausgesprochenen Annahme diese beiden Größen einander gleich sein müssen, so ergibt sich die elektromotorische Kraft unseres Elementes

$$= \frac{25065 \times 0,426 \times 9,81}{96540} \text{ Volt} = 1,085 \text{ Volt.}$$

In der Tat ist die elektromotorische Kraft eines Daniellschen Elementes gerade so groß. Indes ist dieser Schluß nicht in allen Fällen richtig. Es ist ja durchaus nicht notwendig, daß die ganze Wärmemenge, die durch den chemischen Prozeß in dem Element frei wird, sich v o l l s t ä n d i g in elektrische Energie verwandle. Es kann auch ein Teil von dieser Wärme dazu benutzt werden, um die Temperatur des Elementes zu erhöhen und nur ein Teil der chemischen Wärme (der W ä r m e t ö n u n g) wird dann in elektrische Energie verwandelt. Das ist sogar bei den meisten Elementen der wirklich eintretende Fall. Dann ist also die zu beobachtende elektromotorische Kraft kleiner, als sie aus der Wärmetönung sich berechnen würde. Es trifft aber in manchen Fällen auch der umgekehrte Fall ein, daß die elektromotorische Kraft größer ist, als sie sich aus der Wärmetönung berechnen würde. Dann

kann die nötige Energie nur dadurch geliefert werden, daß das Element selbst, während der Strom fließt, sich abkühlt, daß ihm also Wärme entzogen wird, die sich in elektrische Energie umsetzt.

Der Durchgang des galvanischen Stromes durch eine Leitung, die ein Element enthält, ist nach dem Gesagten notwendig abhängig von den chemischen Prozessen, die in dem Element auftreten. Man kann aber daraus noch immer nicht einsehen, warum überhaupt ein Strom zustande kommt. Wenn man z. B. einen Zinkstab in gesättigter Lösung von Zinksulfat hat, so findet dabei von selbst keine nachweisbare Auflösung des Zinks statt. Und wenn man Kupfer in gesättigter Kupfersulfatlösung stehen hat, so findet dabei auch weder eine Auflösung des Kupfers noch ein Ausfällen des Kupfers aus der Lösung statt. Bringt man also einen Zinkstab in eine Tonzelle voll Zinksulfat und um diese herum Kupfersulfat mit metallischem Kupfer, so findet zunächst, wenn die Metalle nicht verbunden sind, gar kein nachweisbarer chemischer Prozeß statt, und man sieht nicht ein, woher es kommt, erstens, daß die Metalle sich dabei am Elektrometer entgegengesetzt elektrisch erweisen und zweitens, daß im Moment, wo wir die Metalle verbinden, auch ein Strom fließt und nun doch eine Auflösung des Zinks und ein Ausfällen des Kupfers vor sich geht.

Für die Erklärung dieser Vorgänge hat sich die Theorie der Lösungen, die wir schon oben (S. 133) anführten, sehr geeignet gezeigt. Nach dieser Theorie sind also in der Lösung eines Salzes, z. B. des Kochsalzes, die aufgelösten Moleküle d i s s o z i i e r t, d. h. eine große Anzahl der Moleküle sind in ihre Ionen zerfallen. Die in einem Lösungsmittel enthaltenen aufgelösten Substanzen verhalten sich nun in vieler Beziehung wie dieselben Substanzen, wenn sie in Gasform sind. So wie ein Gas jedes Volumen, das ihm dargeboten wird, vollständig ausfüllt, also sich von selbst verdünnt, wenn es nur Raum dazu hat, so verdünnt sich auch jede Lösung von selbst, wenn sie nur genügend Lösungsmittel hat. So wie also die Gasteilchen sich selbsttätig voneinander zu entfernen suchen, in größere Abstände zu kommen suchen, so suchen auch die gelösten Teilchen von selbst sich voneinander zu entfernen, größere Zwischenräume zwischen sich zu machen. Bei den Gasen zeigt sich dieses Bestreben, auseinanderzufliegen, dadurch an, daß die Gase auf ihre Gefäßwände einen Druck ausüben, einen um so größeren, je größer die Gasmenge ist, die in dem betreffenden Gefäß enthalten ist. Nach der angeführten Analogie können wir einem gelösten Stoff ganz ebenso einen Druck zuschreiben, den er ausübt, und der zwar nicht die Gefäßwände zu verschieben sucht, der aber den gelösten Stoff in immer größere Mengen Flüssigkeit hineinzutreiben und daher ihn zu verdünnen sucht. Diesen Druck, den man auch durch geeignete Methoden messen kann, nennt man den o s m o t i s c h e n D r u c k der aufgelösten Substanz. Je größer die Zahl der aufgelösten Moleküle (Grammoleküle) in derselben Menge Flüssigkeit ist, um so größer ist der osmotische Druck derselben. Das Verhältnis der Zahl der aufgelösten Grammoleküle einer Substanz zu der Gesamtzahl der Grammoleküle der Lösung nennt man die Konzentration des betreffenden Stoffes in der Lösung und es ist also der osmotische Druck eines Stoffes in einer Lösung um so größer, je größer die Konzentration desselben ist.

Der osmotische Druck hat also die Tendenz, die Lösung zu verdünnen. Er könnte dies am einfachsten dadurch erreichen, daß er die aufgelösten Moleküle aus der Lösung treibt, also sie zum Ausfällen bringt. Nun aber ist bei den festen Körpern eine gleiche Tendenz vorhanden, nämlich die, sich in vorhandenen Flüssigkeiten aufzulösen. Wenn ein festes Salz mit einer Flüssigkeit in Berührung ist, so gehen von selbst Salzteilchen in die Flüssigkeit über, man kann also auch hier von einem Druck sprechen, der die Salzteilchen in die Flüssigkeit treibt. Diesen Druck bezeichnet man als den Lösungsdruck des festen Körpers. Und nun sieht man, daß der Lösungsdruck vom festen Körper in die Flüssigkeit hinein, der osmotische Druck der aufgelösten Substanz dagegen aus der Flüssigkeit hinaus wirkt, so daß die beiden sich entgegenwirken. Haben wir also jetzt eine verdünnte Salzlösung, so sucht zwar der osmotische Druck die aufgelösten Teilchen herauszutreiben und auszufällen; sobald aber ein Teilchen ausgefällt ist, wirkt der Lösungsdruck und treibt das Teilchen wieder in die Flüssigkeit. Solange also der Lösungsdruck der Substanz größer ist als der osmotische Druck, kann sich kein aufgelöstes Teilchen ausscheiden. Erst wenn die Lösung so konzentriert ist, daß ihr osmotischer Druck größer als der Lösungsdruck der festen Substanz ist, scheiden sich die gelösten Teilchen aus und zwar so lange, bis die Konzentration der Flüssigkeit so weit verringert ist, daß ihr osmotischer Druck gerade gleich dem Lösungsdruck der festen Substanz ist. Dann ist Gleichgewicht zwischen der Lösung und der festen Substanz vorhanden.

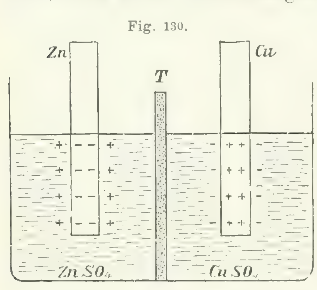
Wenden wir nun diese allgemeinen Vorstellungen, die sich durch Einfachheit und Klarheit auszeichnen und die das Verhalten der Lösungen vollständig zu übersehen gestatten, auf den Fall der galvanischen Elemente an. Wenn wir einen Zinkstab in Wasser stellen, so wird das Zink vermöge des Lösungsdruckes zunächst sich auflösen, also Zinkteilchen in die Lösung zu treiben suchen. Bei Auflösung von Metallen nun muß man annehmen, da ja die Metallionen immer positiv geladen sind, daß sie eben Ionen, d. h. positiv elektrisch geladene Teilchen, nicht neutrale Moleküle in die Lösung senden. Dadurch wird nun das Wasser, welches die Zinkionen bekommt, positiv elektrisch werden, während das Zink, das positive Ladung verloren hat, dadurch negativ elektrisch zurückbleibt. Dadurch ist nun zunächst eine Vorstellung dafür gebildet, daß jedes Metall, das in Wasser taucht, sich negativ elektrisch erweist.

Aber eine weitere Folgerung dieser Ladungen ist nun die, daß überhaupt nur außerordentlich geringe Mengen des Metalls sich auflösen können. Denn die stark positiv geladenen Ionen und das stark negativ geladene Metall ziehen sich an und es wird also der Übergang weiterer Ionen in die Lösung dadurch verhindert, so daß also nur unwägbare Mengen des Metalls sich auflösen und dadurch schon den Spannungsunterschied zwischen Metall und Flüssigkeit hervorbringen.

Ist nun aber die Flüssigkeit, in der das Metall steht, nicht reines Wasser, sondern eine Lösung des betreffenden Metallsalzes, so wird ein Unterschied eintreten, je nachdem der Lösungsdruck des betreffenden Metalles groß oder klein ist gegenüber dem osmotischen Druck der Lösung.

Die edlen Metalle: Gold, Platin, Silber, Kupfer haben im allgemeinen sehr kleine Lösungsdrucke, die unedlen Metalle: Zink, Kadmium, Eisen sehr große. Ist also nun ein Zinkstab in Zinksulfat, so haben die Zinkionen in der Lösung einen gewissen osmotischen Druck, einen um so größeren, je größer die Konzentration der Lösung ist. Dieser wirkt dem Lösungsdruck entgegen, immer aber bleibt der Lösungsdruck noch größer, so daß immer noch Zinkionen von dem Metall in die Flüssigkeit gesendet werden, das Metall also sich negativ, die Flüssigkeit sich positiv ladet, wie in reinem Wasser, nur schwächer. Steht dagegen ein Kupferstab in Kupfervitriollösung, so ist im allgemeinen der osmotische Druck der Lösung größer als der Lösungsdruck des Kupfers, es werden sich also positive Kupferionen aus der Lösung auf dem Metall niederschlagen, das Metall wird positiv und die Lösung negativ elektrisch sein. Nachdem unwägbare Mengen niedergeschlagen sind, wird auch hier Gleichgewicht vorhanden sein, weil die elektrostatischen Kräfte den weiteren Vorgang verhindern. In Fig. 130 ist der Zustand dargestellt, den ein Zinkstab Zn in Zinkvitriollösung ($ZnSO_4$) und ein Kupferstab Cu in Kupfervitriollösung ($CuSO_4$), die durch eine Tonwand T getrennt sind, zeigen werden, wenn beide Metalle frei, nicht verbunden sind. Das Zink wird negativ geladen sein, die benachbarte Flüssigkeit positiv; umgekehrt wird das Kupfer positiv und die benachbarte Flüssigkeit negativ geladen sein.

Fig. 130.



Werden nun die Metalle verbunden, so gleichen sich die Ladungen auf ihnen aus und infolgedessen kann nun das Zink neue Ionen in die Lösung senden, während aus der Kupfervitriollösung sich von neuem wieder Kupfer auf der Elektrode niederschlagen kann.

Man erkennt aus dieser Vorstellung sofort folgendes. Je geringer der osmotische Druck der Zinksulfatlösung ist, um so leichter können die Zinkionen aus dem Zink austreten, desto größer wird also der Spannungsunterschied zwischen Zink und Flüssigkeit sein. Umgekehrt, je größer der osmotische Druck der Kupfersulfatlösung ist, um so mehr Ionen werden aus der Lösung ausgefällt, um so größer wird also der Spannungsunterschied zwischen Kupfer und Flüssigkeit sein. Die elektromotorische Kraft des Elementes, welche die Summe beider Spannungsunterschiede ist, wird also wachsen, wenn die Kupfervitriollösung konzentrierter, die Zinksulfatlösung verdünnter genommen wird. Das ist tatsächlich auch der Fall. Und Ähnliches findet bei jedem anderen Element statt. So sind nicht bloß qualitativ, sondern quantitativ die Vorgänge bei der Stromerzeugung durch galvanische Elemente erklärt.

Kehren wir nun zurück zu der Elektrolyse von Flüssigkeiten, durch die ein Strom hindurchgeht. Wie wir schon mehrfach gesehen haben, ist jede von der Richtung des galvanischen Stromes abhängende Wirkung desselben imstande, umgekehrt wieder einen galvanischen Strom zu erzeugen. Dies zeigt sich auch bei den elektrolytischen Wir-

kungen des Stromes. Wenn man einen galvanischen Strom durch eine Zersetzungszelle schickt und durch ihn die Flüssigkeit elektrolysieren läßt, so wird die Zelle dadurch zu einem galvanischen Element, d. h. es entsteht in ihr eine elektromotorische Kraft, welche selbst umgekehrt imstande ist, einen Strom zu erzeugen. Man kann das in gewissen Fällen a priori einsehen. Lassen wir z. B. den Strom vermittels zweier Bleiplatten durch verdünnte Schwefelsäure gehen, so wird diese elektrolysiert, und es scheidet sich an der einen Bleiplatte Sauerstoff ab, welcher diese Platte oxydiert und, wenigstens an ihrer Oberfläche, zu Bleisuperoxyd umwandelt, was man an der Braunfärbung derselben sofort erkennt, während an der anderen Platte Wasserstoff entweicht. In der Zersetzungszelle stehen also jetzt nicht mehr zwei Platten aus gleichem Metall, zwei reine Bleiplatten, sondern eine mit Bleisuperoxyd bedeckte Platte und eine reine Bleiplatte. Zwei verschiedene leitende Stoffe in einer Flüssigkeit sind aber elektrisch gegeneinander wirksam; folglich muß durch die Elektrolyse in der Zersetzungszelle eine elektromotorische Kraft erzeugt sein. Diese Forderung einer einfachen Überlegung zeigt sich nun tatsächlich in der Natur erfüllt. Aber nicht nur dann, wenn sich die eine Elektrode mit einer sichtbaren Schicht eines anderen Stoffes überzieht. Selbst in Fällen, wo man eine Veränderung der Elektroden nicht erkennen kann und nicht vermuten sollte, sind die Elektroden nach dem Durchgang eines Stromes elektromotorisch gegeneinander wirksam. Tauchen wir z. B. zwei Platinplatten in angesäuertes Wasser und schicken wir einen Strom durch die Zersetzungszelle hindurch, so wissen wir, daß sich an der einen Elektrode Wasserstoff, an der anderen Sauerstoff bildet. Diese Gase, sollte man meinen, verändern die Platinelektroden nicht, so daß diese hierbei nicht elektromotorisch gegeneinander wirksam werden können. Trotzdem werden sie es hier auch. Man sagt: die Elektroden werden p o l a r i s i e r t. Wenn man polarisierte Elektroden durch einen Draht miteinander verbindet, so fließt durch diesen Draht und die Zersetzungszelle ein elektrischer Strom. Man nennt diesen Strom den **P o l a r i s a t i o n s s t r o m**.

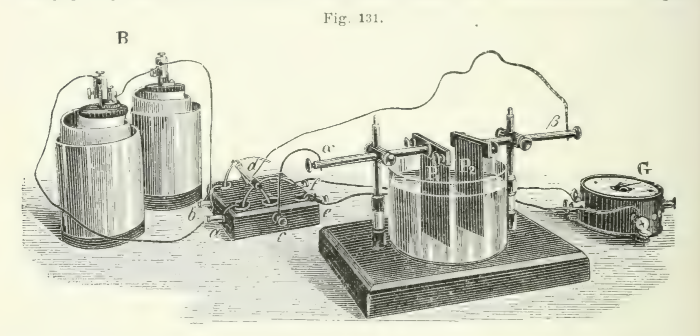
Auf einfache Weise kann man das Auftreten des Polarisationsstromes durch folgende Anordnung nachweisen, bei der man durch einen Umschalter eine Zersetzungszelle zuerst mit einer Batterie, dann aber — unter Ausschaltung der Batterie — mit einem Galvanometer in Verbindung setzt. Als ein solcher Umschalter kann der Kommutator aus Fig. 62 dienen, von dem die mittleren Querdrähte herausgenommen sind. Verbindet man, wie in Fig. 131, zwei Bunsenelemente B mit den Quecksilbernäpfen a und b und die Zersetzungszelle P_1 P_2 (ein Glasgefäß mit verdünnter Schwefelsäure gefüllt, in welche Platinelektroden P_1 und P_2 tauchen) mit den Näpfchen c und d, und legt den Bügel des Kommutators wie in dieser Figur nach links, so polarisiert der Strom die Elektroden in der Zersetzungszelle. Schlägt man dann aber den Bügel nach rechts, so ist die Zersetzungszelle P_1 P_2 nicht mehr mit den Bunsenschen Elementen, sondern mit dem Galvanoskop G verbunden, das an die Quecksilbernäpfe e und f gelegt ist, und die Galvanoskopnadel macht einen Ausschlag und zeigt so den Polarisationsstrom an.

Ob dabei die Zersetzungszelle aus Schwefelsäure mit Platinelektroden oder sonst aus irgend einem Elektrolyten mit Elektroden aus irgend welchem

Metall besteht, ist ganz gleichgültig; immer werden durch den Durchgang des Stromes durch eine elektrolysierbare Flüssigkeit die Elektroden polarisiert und dadurch wird in der Zersetzungszelle eine elektromotorische Kraft erzeugt. (Nur wenn die Flüssigkeit eine Lösung eines Metallsalzes ist und die Elektroden aus demselben Metall bestehen, z. B. Zinkelektroden in Zinksulfatlösung, hat man es mit sogenannten *unpolarisierbaren* Elektroden zu tun.)

Diese elektromotorische Kraft nun erzeugt einen Strom, dessen Richtung der des ursprünglichen, polarisierenden Stromes entgegengerichtet ist. Es fließt z. B. in der Fig. 131 der positive Strom von der Kette B über a, c, α nach P_1 und von diesem durch die Flüssigkeit zu P_2, dann durch β, d, b nach B zurück. Im Polarisationsstrom fließt nun umgekehrt der positive Strom von P_2 durch die Flüssigkeit zu P_1, also geht er in der Richtung P_2, P_1, α, c, e, G, f, d, β. So ist es nicht nur bei dem in der Figur

Fig. 131.



angenommenen Falle, daß Platinelektroden in angesäuertem Wasser polarisiert werden, sondern überhaupt immer. *Der Polarisationsstrom hat immer in der polarisierten Zelle die entgegengesetzte Richtung als der ursprüngliche Strom*, den man auch den polarisierenden Strom nennt. Die Platte P_1 ist mit dem positiven Pol der Batterie, P_2 mit dem negativen Pol verbunden. Nach der Polarisierung fließt der Strom *im Element* von P_2 nach P_1, also außerhalb von P_1 durch das Galvanometer nach P_2. Die Platte P_1 ist also für den Polarisationsstrom die positive Elektrode. *Allgemein ist diejenige Elektrode, die bei der Polarisierung mit dem positiven Pol der Batterie verbunden war, auch die positive Elektrode für den Polarisationsstrom.*

Schon *während* der polarisierende Strom fließt, werden die Elektroden in der Zersetzungszelle elektromotorisch gegeneinander wirksam, und es fließt daher schon während der Polarisierung von der Zersetzungszelle ein Strom durch den Schließungskreis dem polarisierenden Strome entgegen. Es wird also der Strom, der von einer Batterie. z. B. ein Paar Bunsen, durch eine Zersetzungszelle fließt, durch den in entgegengesetzter Richtung fließenden Polarisationsstrom geschwächt.

Wir haben zwei einander entgegenwirkende elektromotorische Kräfte und müssen also das Ohmsche Gesetz schreiben:

$$\text{Stromstärke} = \frac{\text{Elektrom. Kraft der Batterie — Elektrom. Kraft der Polarisation}}{\text{Gesamtwiderstand}}.$$

Die Stärke der Polarisierung der Elektroden ist nun abhängig von der Natur der Elektroden und der zersetzten Flüssigkeit.

Es werden ja durch den polarisierenden Strom die Anionen der Lösung zur Anode, die Kationen der Lösung zur Kathode getrieben, geben dort ihre Ladungen ab und bleiben als unelektrische Moleküle entweder ganz oder zum Teil an den Elektroden haften. Die gasförmigen Körper, wie Wasserstoff und Sauerstoff, entweichen zum Teil in die Luft, zum Teil werden sie von den Elektroden aufgenommen und okkludiert. Die an oder in den Elektroden sich ablagernden Schichten haben aber wieder die Tendenz, in Lösung überzugehen, sie haben wieder einen Lösungsdruck und dieser Lösungsdruck treibt sie wieder in die Flüssigkeit hinaus, entgegen der Richtung des polarisierenden Stromes. Das ist der Grund, warum der Polarisationsstrom die entgegengesetzte Richtung in der Flüssigkeit hat wie der polarisierende Strom.

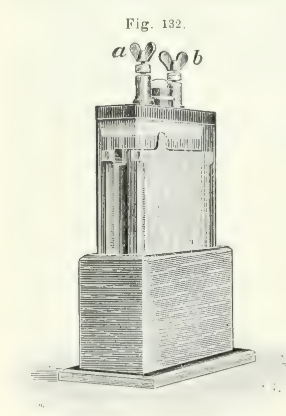
Jedes polarisierte Element hat daher eine bestimmte elektromotorische Kraft, die abhängt von der Natur der Stoffe, die auf den Elektroden niedergeschlagen sind, und von der Natur der Flüssigkeit. Es wird also, wenn die Stärke des polarisierenden Stromes wächst, die elektromotorische Kraft des Polarisationselementes zuerst zunehmen bis zu diesem Wert, dann aber nahezu konstant auf der einmal erreichten Höhe bleiben, so daß eine Vergrößerung der polarisierenden Stromstärke dann keinen weiteren Erfolg mehr hat. Falls nun die elektromotorische Kraft des polarisierenden Stromes unter diesem Maximum liegt, so kann sie selbstverständlich die Elektroden der Zersetzungszelle nicht bis zum Maximum ihrer Polarisation laden; denn sowie die elektromotorische Kraft des Polarisationsstromes die des ladenden Elementes überwiegen würde, würde ja der Strom in umgekehrter Richtung fließen und die Polarisation wieder aufheben. Es ist dann also, bis zu diesem Maximum, die elektromotorische Kraft des Polarisationsstromes gleich der des polarisierenden Stromes. Bei Platinelektroden in angesäuertem Wasser beträgt das Maximum der Polarisation 2,7 Volt; dies ist die höchste elektromotorische Kraft, die sich bei der Polarisation von Platinplatten in angesäuertem Wasser erzeugen läßt. So hat ein jedes polarisierte Element eine bestimmte elektromotorische Kraft.

Wenn man nun von einem polarisierten Elemente, welches man auch ein sekundäres Element nennt, den Strom durch einen Schließungskreis fließen läßt, so fließt er durch dieses Element selbst in umgekehrter Richtung, als vorher der polarisierende Strom geflossen war. Er bringt nun in dem sekundären Element selbst auch wieder Elektrolyse hervor, und da er in umgekehrter Richtung fließt wie der polarisierende Strom, so wird an der Platinplatte, die mit Sauerstoff bedeckt war, jetzt Wasserstoff erzeugt, und an derjenigen, die mit Wasserstoff bedeckt war, jetzt Sauerstoff erzeugt. Folglich nimmt die elektrolytische Veränderung, die der polarisierende Strom erzeugt hat, durch

diese entgegengesetzte Veränderung allmählich ab, und immer mehr ab, je länger der Polarisationsstrom fließt. Wenn schließlich die Veränderungen ganz neutralisiert, ganz verschwunden sind, so hört der Polarisationsstrom ganz auf. Der Polarisationsstrom aus einer polarisierten Zelle dauert also nur eine bestimmte Zeit hindurch, so lange, bis die chemische Veränderung in der Zersetzungszelle wieder ganz zurückgebildet ist.

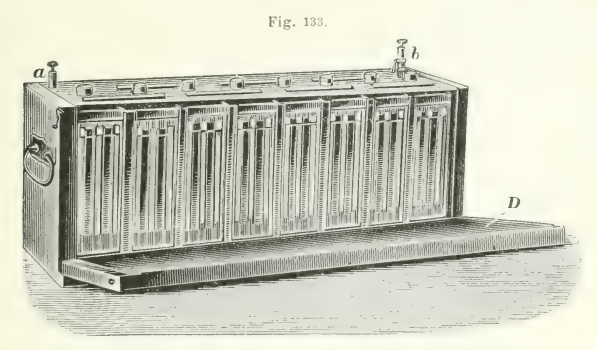
Natürlicherweise kann man eine Reihe von sekundären Elementen auch hintereinander oder nebeneinander verbinden. Man bekommt dann eine Polarisationsbatterie oder Sekundärbatterie. Man kann also durch eine Reihe von solchen sekundären Elementen, hintereinander geschaltet, eine Batterie von sehr großer elektromotorischer Kraft bekommen, oder bei Nebeneinanderschaltung eine solche, die außerordentlich starke Ströme liefert, aber natürlich nur eine gewisse Zeit hindurch. Zu neuem Gebrauch muß man dann die Batterie von neuem polarisieren oder, wie man sagt, laden. In der technischen Anwendung bezeichnet man diese Sekundärbatterieen als Akkumulatoren, weil sie gestatten, die Energie des polarisierenden Stromes aufzusammeln und anzuhäufen. In Kapitel 3 des zweiten Teiles werden diese Akkumulatoren ausführlicher besprochen. Hier sei nur erwähnt, daß die jetzt gebräuchlichen Akkumulatoren eben gerade aus Bleiplatten in verdünnter Schwefelsäure bestehen. Beim Polarisieren durch einen äußeren Strom, beim Laden des Akkumulators, wird die eine Bleiplatte durch den herantretenden Sauerstoff auf eine gewisse Dicke in Bleisuperoxyd verwandelt, während die andere zu reinem Blei wird. Wenn der Akkumulator geladen ist, so hat er eine elektromotorische Kraft von 2,02 Volt und kann nun bei der Verbindung der Pole durch einen äußeren Schließungskreis, bei der Entladung, so lange Strom abgeben, bis seine Ladung nahezu aufgebraucht ist. Solche Bleiakkumulatoren sind nicht bloß im großen sehr bequem, wie im zweiten Teil besprochen wird, sondern auch für den Gebrauch im kleinen, zu Experimenten, sehr empfehlenswert. Sie werden jetzt in den Laboratorien fast allein da angewendet, wo man früher mit galvanischen Elementen arbeitete. Fig. 132 zeigt einen kleinen, bequem tragbaren Akkumulator von 2 Volt Spannung. Bei a und b sind die Pole. In dem Glasgefäß befinden sich die Bleiplatten und zwar eine positive mit Bleisuperoxyd bekleidete zwischen zwei parallel geschalteten negativen, die aus reinem Blei bestehen. Fig. 133 zeigt einen größeren Akkumulator von 16 Volt Spannung, der also acht größere Zellen enthält. Diese sind in einem tragbaren Holzkasten mit beweglicher Seitenwand D enthalten, die für gewöhnlich zugeklappt wird. Bei a und b sind die Pole der Batterie.

Fig. 132.



In jüngster Zeit hat man durch den Edisonakkumulator, wie er von der Deutschen Edison-Akkumulatoren-Company in Berlin hergestellt wird, einen weiteren, sehr bequemen Akkumulator für Laboratoriumsgebrauch bekommen, der eine kleinere elektromotorische Kraft, nämlich 1,23 Volt besitzt, dem man aber, bei bequemer Größe, ohne Schaden viel

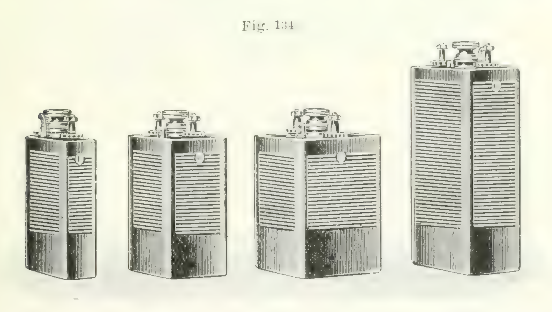
Fig. 133.



stärkere Ströme entnehmen darf, als gleichgroßen Bleiakkumulatoren. Fig. 134 zeigt einige Formen dieser Akkumulatoren, deren nähere Einrichtung im zweiten Teil Kapitel 3 besprochen werden wird.

Solche Akkumulatoren müssen von Zeit zu Zeit geladen werden, um immer wieder Strom abgeben zu können. Bei den gebräuchlichsten

Fig. 134

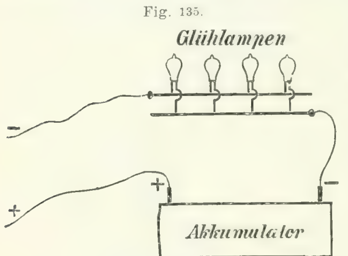


Akkumulatoren ist die Stromstärke, mit welcher jede Zelle geladen und entladen werden soll, nach der Größe so ausprobiert, daß eine höhere als die angegebene Stromstärke der Haltbarkeit des Akkumulators schädlich ist. So werden z. B. Bleiakkumulatoren von der in Fig. 132 gezeichneten Größe mit etwa 5 Ampere geladen, während die Edisonakkumulatoren der vier gezeichneten Größen 7,5 bis 30 Ampere bei der Ladung erhalten sollen. Diese Ladungen nimmt man da, wo durch elektrische Zentralen Strom verteilt wird, natürlich am besten mit dem

Zentralenstrom vor. Da dieser aber gewöhnlich eine Spannung von 110 Volt besitzt, also dem Akkumulator, wenn er direkt eingeschaltet würde, viel zu starken Strom liefern würde, so schaltet man zweckmäßig einen Glühlampenrheostaten (S. 113) vor. Das Schema der Stromleitung ist dann durch Fig. 135 gegeben. Von der Stromquelle (der Zentrale) wird der + Pol mit dem + Pol des Akkumulators verbunden und vom — Pol desselben geht die Leitung durch einen Glühlampenrheostaten (oder auch eine einzelne Glühlampe) zum — Pol der Stromquelle. Da gewöhnlich die + und — Pole der Stromquelle nicht bezeichnet sind, so kann man die richtige Verbindung durch einfaches Probieren finden. Bei der richtigen Verbindung des Akkumulators und der Stromquelle müssen nämlich die Glühlampen schwächer leuchten als normal, weil Hauptstrom und Akkumulatorenstrom dabei einander entgegenwirken; bei der falschen Verbindung müssen die Glühlampen dagegen heller brennen, weil die beiden Ströme sich addieren.

Eine große Reihe von kleinen Akkumulatoren, mehrere tausend, hintereinander geschaltet, die also Spannungen von mehreren tausend Volt geben, werden als Hochspannungsakkumulatoren bezeichnet. Fig. 136 gibt eine Ansicht einer Batterie von 25 solcher kleinen Zellen, wie sie in der physikalisch-technischen Reichsanstalt benutzt werden. Jedes einzelne Glas enthält zwei Bleiklötze als Elektroden und ist oben dicht abgeschlossen. Ein Glasröhrchen führt in das Innere des Glases und erlaubt einerseits eine Füllung des Glases mit Schwefelsäure, andererseits ein Entweichen der bei der Ladung auftretenden Gase. Natürlich muß man zur Ladung einer solchen Hochspannungsbatterie, wenn man etwa 110 Volt im ladenden Strom zur Verfügung hat, immer je eine Reihe von 50 Zellen einzeln laden, oder mehrere Reihen von 50 Zellen parallel schalten. Schaltet man dann die Reihen alle oder zum Teil hintereinander, so kann man also Ströme von sehr hoher Spannung erhalten. Da bei solch hochgespannten Strömen es sehr auf die Isolation aller Teile ankommt, so sind die einzelnen Elemente vollkommen isoliert aufgestellt.

Fig. 135.

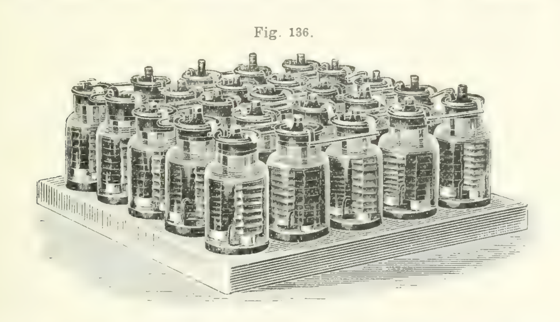


Das Auftreten der Polarisation in einer von einem Strome durchflossenen Flüssigkeit klärt uns nun auch auf, warum es nicht möglich ist, die Widerstände von Flüssigkeiten in derselben Weise durch die Methode der Wheatstoneschen Brücke zu bestimmen, wie die von festen Körpern. Fließt nämlich der Strom durch eine Flüssigkeit, so tritt eine entgegenwirkende elektromotorische Kraft auf, deren Größe man nicht kennt und die überdies veränderlich ist. Für diese gilt dann die direkte Methode der Widerstandsmessung durch die Wheatstonesche Brücke nicht. Um eine Flüssigkeit nun doch einfach wie einen Leiter erster Klasse behandeln zu können, ist es notwendig, die Polarisation aufzuheben, und das geschieht eben durch Wechselströme, wie wir auf S. 93 gesehen haben. Gegen

Wechselströme verhält sich ein Leiter zweiter Klasse wie ein Leiter erster Klasse. Es tritt keine Polarisation auf und man kann die Flüssigkeit dann ebenso behandeln wie ein Metall.

In manchen Fällen kann ein elektrischer Strom, wenn er durch eine Flüssigkeit, diese elektrolysierend, hindurchgeht, noch besondere auffallende Wirkungen hervorbringen. Es kann nämlich vorkommen, daß die an der einen oder der anderen Elektrode abgeschiedenen Substanzen mit dieser Elektrode eine chemische Verbindung erzeugen, die ein so schlechter Stromleiter ist, daß der Stromdurchgang dabei ganz oder fast ganz aufhört. Man sagt dann, es werde an der Elektrode ein Übergangswiderstand erzeugt. Das auffallendste Beispiel dafür gibt die Elektrolyse von Flüssigkeiten, wie etwa eine Lösung von doppelt kohlensaurem Natron, wenn die eine Elektrode und zwar die positive aus Aluminium besteht. Es scheidet sich dann durch einen hindurchgeschickten Strom an der Aluminiumelektrode Sauerstoff ab und dieser geht mit dem Aluminium eine Verbindung ein, die den Strom

Fig. 136.



so schlecht leitet, daß der Stromdurchgang dadurch sofort fast ganz aufgehoben wird. Wenn man elektromotorische Kräfte bis 100 Volt anwendet, so kann man durch eine solche Zelle in derjenigen Richtung, in welcher das Aluminium Anode ist, nur ganz schwache Ströme, solche von wenigen Milliampere hindurchbringen, während bei größeren angewendeten elektromotorischen Kräften trotz des Übergangswiderstands stetig wachsende Ströme hindurchgehen. Die Aluminiumelektrode sperrt, wenn sie mit dem positiven Pol verbunden ist, in Lösungen von doppelt kohlensaurem Natron von jeder angewendeten Spannung 100 Volt ab. Wenn man die Stromrichtung umkehrt, also die Aluminiumelektrode mit dem negativen Pol verbindet, so geht dagegen der Strom ohne Schwierigkeit mit seiner vollen Spannung durch die Zelle. Eine solche Zelle mit einer positiven Aluminiumelektrode und einer beliebigen negativen Elektrode (z. B. aus Blei oder Eisen oder Kohle) wirkt also wie ein Ventil. Sie läßt Ströme, deren Spannung bis 100 Volt beträgt, in der einen Richtung nicht hindurch, in der anderen Richtung, in der das Aluminium Kathode ist, wohl. Man nennt diese Zellen Graetzsche Zellen oder Drosselzellen. Man muß in einer solchen Zelle Flüssigkeiten be-

nutzen, welche die Eigenschaft haben, an der Anode Sauerstoff direkt oder durch sekundäre Prozesse zu entwickeln. Vorteilhaft haben sich als Flüssigkeiten die Lösungen von phosphorsauren Salzen (Natriumphosphat) oder borsauren Salzen (Ammoniumborat), oder auch von doppeltkohlensaurem Natron erwiesen, allgemein Lösungen von Salzen, die eine sehr schwache Säure wie Phosphorsäure, Borsäure, Kohlensäure enthalten. Im zweiten Teil Kap. 4 wird eine wichtige Anwendung dieser Zellen beschrieben werden.

---

7. Kapitel.

Die magnetischen Wirkungen des elektrischen Stromes.

Alle Wirkungen eines galvanischen Stromes, die in den vorhergehenden Kapiteln besprochen wurden, fanden in der Bahn des Stromes selbst statt. Der Stromkreis wurde erwärmt nach dem Jouleschen Gesetz, an den Verbindungsstellen zweier verschiedener Metalle trat die Peltiersche Wirkung auf. An der Unterbrechungsstelle eines starken Stromes entstand der galvanische Lichtbogen; Flüssigkeiten endlich, die vom Strome durchflossen wurden, wurden elektrolysiert, in ihre Bestandteile zerlegt.

Mit diesen bisher angeführten Erscheinungen sind aber die Wirkungen des galvanischen Stroms lange nicht erschöpft. Schon bei der Meßmethode, welche wir für den galvanischen Strom anwendeten, mittels eines Galvanometers, hatten wir die Wirkung des Stromes auf einen Magneten benutzt, indem die Ablenkung der Magnetnadel von ihrer natürlichen Nord-Südrichtung uns das Vorhandensein eines elektrischen Stroms anzeigte. Diese Wirkung ist jedoch nur eine ganz spezielle in einer großen, allgemeinen Klasse von Beziehungen, welche durch die fortgesetzten Untersuchungen der verschiedensten Physiker zwischen Elektrizität und Magnetismus aufgedeckt wurden. Man faßt die gesamte Lehre von den Beziehungen der elektrischen Ströme zum Magnetismus unter dem Namen „Elektromagnetismus“ zusammen.

Jeder Magnet hat bekanntlich zwei Pole, einen Nordpol und einen Südpol. Wir benutzen solche Magnete gewöhnlich in der Form von Stäben, wie Fig. 137, oder von Hufeisen, wie Fig. 138, oder von Nadeln, wie Fig. 139. Hängt man einen Magnetstab oder eine Magnetnadel auf, so daß sie sich horizontal frei drehen können, so stellen sie sich, wie man weiß, immer in eine ganz bestimmte Richtung. Dasjenige Ende, welches nach dem Norden der Erde zeigt, nennt man den Nordpol, das entgegengesetzte den Südpol des Magneten. Jeder Magnet hat ferner noch die bekannte wichtige Eigenschaft, daß er andere Magnete anzieht, resp. abstößt. Es sind die Gesetze der Anziehung und Abstoßung von zwei Magnetpolen genau dieselben wie diejenigen der Anziehung und Abstoßung von zwei elektrischen Körpern. Gleichnamige Magnetpole stoßen einander ab, ungleichnamige ziehen einander an. Nur können wir niemals einen einzigen Magnetpol allein erzeugen, sondern immer ist an demselben Stück Eisen auch der entgegengesetzte Pol vorhanden. Das ist ein wesentlicher Unterschied gegenüber der Elektrizität. Denn bei dieser können wir einen Körper bekanntlich positiv laden, etwa durch Reibung, und die negative Elektrizität einem ganz anderen, entfernten Körper mitteilen. Bei einem Magneten sind aber im Gegensatz dazu immer die beiden Pole an demselben Stück Eisen zusammen, niemals

an getrennten Stücken, und daher hängen auch die Kräfte, die ein Magnet zeigt, immer von beiden Polen ab. Doch kann man den Magneten so lang machen, etwa eine lange magnetisierte Stricknadel nehmen, daß man oft im wesentlichen nur die Wirkung eines einzigen Poles beobachten kann.

Daß eine Magnetnadel von selbst immer nach Norden zeigt, erklärt man sich bekanntlich daraus, daß die ganze Erde selbst ein Magnet ist, dessen Südpol im Norden liegt, so daß alle Nordpole von Magnetstäben sich nach ihm hindrehen. Man bezeichnet diejenige Richtung, in der sich eine drehbare Magnetnadel an einem beliebigen Ort der Erde einstellt, als den magnetischen Meridian dieses Ortes. Dieser stimmt ungefähr, aber nicht ganz mit dem geographischen Meridian dieses Ortes überein. An jeder Stelle der Erdoberfläche wird also die Magnetnadel mit einer gewissen Kraft in die Richtung des Meridians gedreht und dort gehalten,

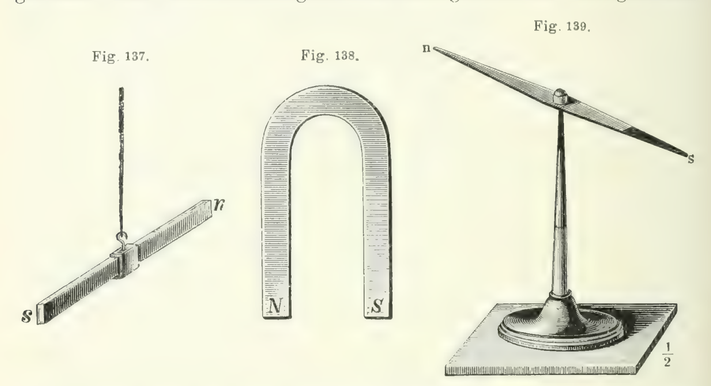


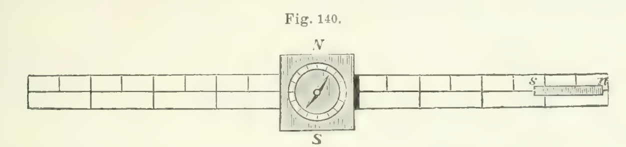
Fig. 137. Fig. 138. Fig. 139.

so daß, wenn man die Nadel aus dem Meridian herausdreht, sie sich nach einigen Schwingungen wieder in denselben einstellt. Es muß also von der Erde an jeder Stelle eine gewisse Kraft auf die beiden Pole einer Magnetnadel ausgeübt werden. Man sagt, die Erde besitze an jedem Punkt ihrer Oberfläche eine gewisse magnetische Horizontalintensität. Diese ist verschieden groß an den verschiedenen Punkten der Erde und wir werden bald ein Mittel finden, um sie der Größe nach zu messen.

Wir müssen nämlich, um die Erscheinungen des Magnetismus genau zu verstehen, versuchen, sie quantitativ in Zahlen auszudrücken. Schon aus dem bloßen einfachen Versuch, daß wir etwa einen in der Hand gehaltenen Schlüssel von einem Magneten anziehen lassen, erkennen wir, daß verschiedene Magnete verschieden stark wirken. Man sagt von einem Magneten, der eine stärkere Wirkung ausübt als ein anderer, er habe ein größeres magnetisches Moment, und wir wollen zuerst versuchen, die magnetischen Momente verschiedener Magnete miteinander numerisch zu vergleichen. Das einfachste Mittel dazu ist folgendes. Wir setzen (Fig. 140) eine Kompaßnadel auf die Mitte eines geteilten Maßstabes und bringen unseren Magnetstab s n, dessen Moment wir bestimmen

wollen, in einige Entfernung von der Nadel in die Lage, die in der Figur bei s n gezeichnet ist. Die Kompaßnadel wird infolge der magnetischen Wirkung des Stabes um einen kleinen Winkel aus dem Meridian herausgedreht werden. Bringen wir an Stelle von s n andere, verschieden starke Magnetstäbe, so wird die Nadel um verschieden große Winkel herausgedreht werden und diese Ablenkungen der Nadel bieten uns ein Maß für die Größe der magnetischen Momente unserer Stäbe. Wir können auch umgekehrt die verschieden starken Stäbe in verschiedene Entfernungen bringen, so daß die Nadel jedesmal um den gleichen Winkel sich dreht. Die Momente der einzelnen Stäbe verhalten sich dann umgekehrt wie die

Fig. 140.



dritten Potenzen der Entfernung der Nadelmitte von der Mitte des Magnetstabes. Wir brauchen nun bloß noch einen bestimmten Stab als Einheit festzusetzen und also zu sagen, daß er die Einheit des magnetischen Moments haben soll, so können wir alle magnetischen Momente von Magnetstäben, Nadeln u. s. f. in diesen Einheiten ausdrücken. In den gewöhnlich gebrauchten Einheiten hat z. B. ein Magnetstab von etwa 15 cm Länge und der Form wie der in Fig. 137, wenn er kräftig magnetisiert ist, ein Moment von etwa 1000 Einheiten.

Sind irgendwo in einem Raume magnetische Kräfte aus irgend einer Ursache vorhanden, so wirken sie auf eine Magnetnadel, die drehbar aufgehängt ist, ein, indem sie die Nadel in solche Lage zu bringen suchen, daß diese sich in die Richtung der Kraft einstellt. Man kann daher umgekehrt aus der Richtung, in der sich eine kleine Magnetnadel einstellt, wenn sie frei beweglich ist, auf die Richtung der magnetischen Kräfte schließen. Davon werden wir bald eine Anwendung machen. Man bezeichnet einen Raum, in welchem aus irgendwelcher Ursache magnetische Kräfte wirken, als ein *magnetisches Feld*. Insbesondere hat also die Erde auch ein magnetisches Feld. Je stärker die Kräfte sind, die ein magnetisches Feld auf einen gegebenen Magnetstab ausübt, um so größer, sagen wir, ist die *Intensität* des Feldes oder die *Feldstärke*.

Wir können nun offenbar mittels eines Magnetstabes, dessen magnetisches Moment wir kennen, die Intensität des magnetischen Feldes der Erde in horizontaler Richtung, eben die sogenannte *Horizontalintensität*, an jedem beliebigen Punkte messen. Hängen wir nämlich diesen Stab an einem Faden auf, so stellt er sich zunächst in den Meridian ein, und drehen wir ihn nun willkürlich etwas heraus, so wird er, sobald er losgelassen ist, wieder in die Meridianrichtung zurückzukehren suchen und wird infolgedessen Schwingungen um die Gleichgewichtslage machen. Je stärker die Intensität des magnetischen Feldes ist, um so rascher werden diese Oszillationen verlaufen, und aus der Dauer einer solchen Schwingung,

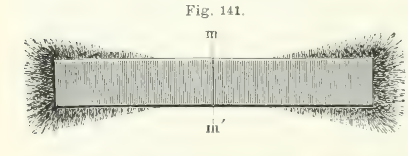
die man leicht messen kann, kann man so die Stärke oder Intensität des erdmagnetischen Feldes, welches auf den Magnetstab wirkt, messen. Wenn man noch festsetzt, daß diejenige Feldstärke die Einheit sein soll, welche auf einen Magnetstab vom Moment 1 eine drehende Kraft gleich 1 ausübt, so kann man auch alle Feldstärken in bestimmten Zahlen ausdrücken. So findet man, daß die Horizontalintensität des erdmagnetischen Feldes an verschiedenen Punkten der Erdoberfläche etwas verschiedene Werte hat, die z. B. in Europa zwischen 0,24 (im Süden) und 0,12 (im Norden) in unseren Einheiten schwanken. In München z. B. ist sie fast genau 0,20.

So wie wir hier die Intensität des magnetischen Feldes der Erde messen konnten, so können wir nun auch, wenigstens im Prinzip, die Intensität jedes magnetischen Feldes bestimmen, das von irgend einem beliebigen Magneten gebildet wird. Natürlich wird ein solches Feld verschiedene Intensität haben, je nachdem man nah an dem Magneten sich befindet oder weit von ihm entfernt. So werden wir z. B. magnetische Felder finden, die so stark sind, daß ihre Intensität durch die Zahl 30 000 ausgedrückt wird, die also 150 000mal so große Intensität haben wie das Horizontalfeld der Erde.

Doch wir wollen zunächst noch einige Eigenschaften der Magnete weiter besprechen.

Ein Magnet wirkt bekanntlich nicht bloß auf einen anderen Magneten mit Anziehungs- und Abstoßungskräften, sondern er wirkt auch auf unmagnetisches Eisen, indem er dieses immer anzieht. Dies beruht auf einer Wirkung, die ganz analog ist der elektrischen Influenz. Wird nämlich ein unmagnetisches Stück weichen Eisens in die Nähe eines Magneten gebracht, so wird es schon dadurch selbst magnetisch, ganz so wie ein unelektrischer Körper in der Nähe eines elektrisierten durch Influenz elektrisch wird. Man sagt auch hier: ein Magnet erzeugt in einem unmagnetischen Stück Eisen Magnetismus durch *magnetische Influenz* oder *Induktion*. Deswegen wird weiches unmagnetisches Eisen von einem Magneten immer angezogen. Denn jeder Pol erzeugt in dem genäherten Stück weichen Eisens in seiner Nachbarschaft den entgegengesetzten Pol und entfernt davon den gleichnamigen. Folglich überwiegt die Anziehung zwischen den zwei entgegengesetzten Polen, die nahe bei einander sind, und das influenzierte Stück Eisen wird angezogen. Man kann das sehr deutlich sehen, wenn man einen Magnetstab in Eisenfeilspäne einsteckt und herauszieht; diese bleiben, wie in Fig. 141, an den Enden des Magnetstabes haften, weil jeder Span zu einem Magneten geworden ist.

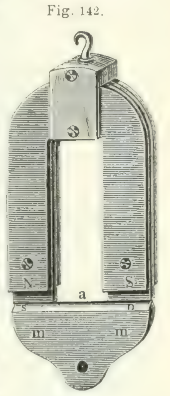
Fig. 141.



Wird ein induziertes Stück weichen Eisens von dem Magneten wieder entfernt, so hat es seinen Magnetismus vollständig verloren. Anders dagegen ist es mit dem Stahl. Ein durch Influenz magnetisiertes Stück Stahl behält immer ein wenig von seinem Magnetismus zurück, auch wenn es von dem influenzierenden Körper entfernt wird. Man kann un-

magnetische Stücke von weichem Eisen und von Stahl durch Bestreichen mit einem schon vorhandenen Magneten magnetisieren. Auch hierbei zeigt es sich, daß das weiche Eisen seinen Magnetismus sehr rasch verliert, während Stahl ihn behält. Man macht daher dauernde Magnete, sogenannte permanente Magnete, immer aus Stahl, am besten aus Wolframstahl. Im Gegensatz zu den permanenten Magneten nennt man diejenigen, welche nur so lange magnetisch bleiben, als der induzierende magnetische Körper in der Nähe ist, temporäre Magnete.

Fig. 142.

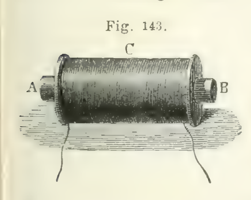


Ein jeder Magnet ist nicht bloß an seinen Polen magnetisch, sondern überall in seiner ganzen Ausdehnung. An den Polen treten nur die magnetischen Kräfte dadurch besonders scharf zutage, daß sie dort starke anziehende und abstoßende Wirkungen ausüben. Werden die Pole eines Magneten durch ein Stück Eisen (welches man den Anker nennt) verbunden, so sagt man, der Magnet ist geschlossen. Ein solcher Magnet übt viel geringere anziehende oder abstoßende Kräfte nach außen aus als ein ungeschlossener, aber er ist trotzdem ein vollständiger Magnet und kann in anderer Weise auch sehr erhebliche magnetische Wirkungen ausüben, wie wir später sehen werden. Einen solchen geschlossenen Magneten nennt man auch einen pollosen Magneten, weil er eben keine freien Pole hat. Das einfachste Beispiel dafür bietet der in Fig. 142 gezeichnete Magnet NS mit seinem Anker m m, ein anderes Beispiel gibt ein magnetisierter Eisenring.

Lange Zeit konnte man Eisen nur dadurch magnetisch machen, daß man es mit schon vorhandenen Magneten bestrich oder es dessen Influenzwirkung aussetzte. Es war eine Entdeckung von hervorragender Wichtigkeit, als man erkannte, daß man dasselbe auch mit elektrischen Strömen erreichen kann.

Wenn man einen galvanischen Strom spiralförmig um einen unmagnetischen Stab weichen Eisens herumführt, so wird der Eisenstab magnetisch. Um den Versuch zweckmäßig auszuführen, umwickelt man, wie Fig. 143 zeigt, einen Hohlzylinder von Holz C mit einer Reihe von Windungen aus übersponnenem Draht. Die Enden dieser Drahtwindungen führen nach außen und werden mit den Polen einer galvanischen Batterie verbunden. Es fließt also der Strom um diesen Zylinder in lauter spiralförmigen Windungen.

Fig. 143.



Wenn man nun in die Höhlung des Zylinders einen Stab unmagnetischen weichen Eisens AB hineinbringt, so wird der Stab außerordentlich kräftig magnetisch, und zieht anderes Eisen, z. B. einen Schlüssel an. Das eine Ende des Stabes wird ein Nordpol, das andere ein Südpol. Man nennt deshalb einen solchen mit Draht umwickelten Zylinder eine Magnetisierungsspule. Sowie man den Strom unterbricht, hört der Magnetismus in

dem weichen Eisen AB auf und der angezogene Schlüssel fällt wieder ab. Das Eisen ist also nur durch die Wirkung des Stromes magnetisch geworden. Man nennt deshalb einen solchen Magneten, der durch den elektrischen Strom erst magnetisch wird, einen Elektromagneten.

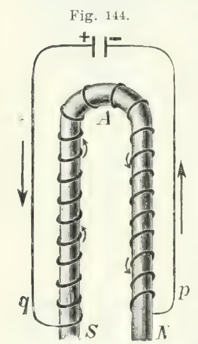
Jeder Magnetstab hat einen Nordpol und einen Südpol; es fragt sich also zunächst, welches Ende des Stabes AB wird hier ein Nordpol, welches ein Südpol? Die Beantwortung dieser Frage wird durch eine Regel gegeben, die von Ampère ausgesprochen ist, und welche die Ampèresche Schwimmerregel heißt:

Denkt man sich in dem Draht der Magnetisierungsspirale in der Richtung des positiven Stromes schwimmend, so daß man mit dem Gesicht dem Magnetstab zugewendet ist, so ist immer dasjenige Ende des Stabes ein Nordpol, welches zur linken Hand liegt.

Kehrt man also durch einen Kommutator die Richtung des Stromes in der Magnetisierungsspirale um, so wird auch der Magnetismus in AB umgekehrt; dasjenige Ende, das vorher ein Nordpol war, wird jetzt ein Südpol und umgekehrt.

Ebenso wie man einen geraden Stab von weichem Eisen magnetisieren kann, kann man auch einen hufeisenförmig gebogenen Stab magnetisieren.

Fig. 144.

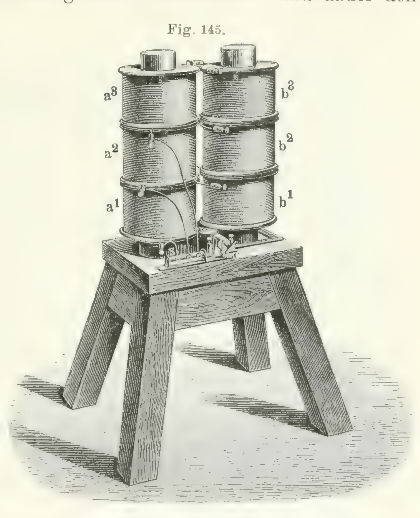


Man braucht nur den Stab oder seine Enden mit Draht spiralförmig fortlaufend zu umwickeln. Fig. 144 zeigt einen solchen umwickelten Hufeisenmagneten. Man kann sich denken, daß der Eisenstab erst gerade gestreckt war und hintereinander nach derselben Richtung umwickelt war, und daß er dann erst hufeisenförmig gebogen wurde. Die Anwendung der Ampèreschen Schwimmerregel zeigt bei der durch die Pfeile angegebenen Richtung des Stromes, daß die beiden Pole bei S und N liegen. Nachdem der Stab hufeisenförmig gebogen ist, scheinen die beiden Enden in entgegengesetzter Richtung umwickelt zu sein. Umwickelt man sie faktisch in entgegengesetzter Richtung, so daß sie dem Anschein nach in gleicher Richtung umwickelt sind, so werden die beiden Enden des Hufeisens gleiche Pole, die entgegengesetzten Pole liegen dann oben in der Biegung des Hufeisens.

Auf diese Weise kann man also durch Herumsenden eines galvanischen Stromes um einen weichen Eisenkern außerordentlich starke temporäre Magnete machen. In Fig. 145 ist eine oft benutzte Anordnung gezeichnet, welche zur Hervorbringung sehr starker Elektromagnete dient. Zwei dicke Zylinder aus weichem Eisen stehen auf einem festen Tisch, auf welchem sie durch eine Querplatte von Eisen unten verbunden sind. Um jeden von den Eisenzylindern sind drei Magnetisierungsspulen $a^1 a^2 a^3$ und $b^1 b^2 b^3$ geschoben, durch welche der Strom hindurchgesendet werden kann. Die Spulen $a^1 a^2 a^3$ und $b^1 b^2 b^3$ werden so miteinander verbunden, daß die beiden herausragenden Enden des Eisenzylinders entgegengesetzt magnetisch werden, der eine ein Nordpol, der andere ein Südpol.

An dem Tisch sind gewöhnlich Klemmschrauben angebracht, um den Strom in die Magnetisierungsspulen einleiten zu können, und außerdem ein Kommutator, welcher dazu dient, die Pole der Magnete rasch wechseln zu können, oder auch den Strom ganz zu unterbrechen und daher den Magnetismus des Eisens ganz aufzuheben. Wenn das eine Ende des Hufeisens ein Nordpol, das andere ein Südpol ist, und man die Enden der Eisenstäbe von oben ansieht, so fließt der positive Strom um beide in entgegengesetzter Richtung, wie es in Fig. 146 gezeichnet ist. Man kann sich durch Anwendung der Ampèreschen Schwimmerregel sofort überzeugen, daß die in dieser Figur gezeichnete Stromrichtung die richtige ist. Um stets sofort zu wissen, wie der Strom um einen Magnetpol fließt, kann man sich merken, daß er um einen Südpol, von oben gesehen, in der Richtung fließt, wie der Zeiger einer Uhr sich bewegt, um einen Nordpol entgegengesetzt dem Zeiger einer Uhr.

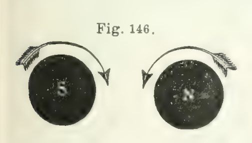
Fig. 145.



Durch Aufsetzen von zweckmäßig gestalteten Eisenkörpern auf die Pole, die man dann Polschuhe nennt, kann man zwischen diesen ein sehr kräftiges magnetisches Feld erzeugen.

Zwei andere, vielfach benützte Formen der Elektromagnete sind in Fig. 147 und 148 gezeichnet. In Fig. 147 sind zwei mit Draht umwickelte Eisenkerne vorhanden, welche auf der eisernen Grundplatte horizontal stehen und in beliebige Abstände gestellt werden können. Man sieht in der Figur nebenbei zwei Polschuhe PP mit ziemlich spitz zulaufenden Formen abgebildet, welche in die Pole eingesetzt werden können und nun in dem Zwischenraum zwischen sich auch ein starkes Feld entstehen lassen. Die Umwickelungen der Magnetkerne verbindet man wieder so, daß die beiden Pole entgegengesetzt magnetisch werden.

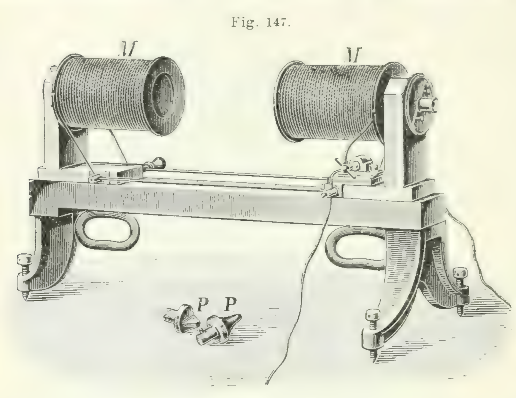
Fig. 146.



Die stärksten magnetischen Felder erzielt man durch die Anwendung eines sogenannten Halbringelektromagnetes, wie ihn Fig. 148 zeigt. Bei diesem sind zwei kreisförmig gebogene Eisenstücke auf einer Grundplatte von Eisen angeschraubt. Sie sind mit zusammen acht Magnetisierungsspulen umgeben, welche hintereinander geschaltet werden können. An die Polenden PP können verschieden geformte Pol-

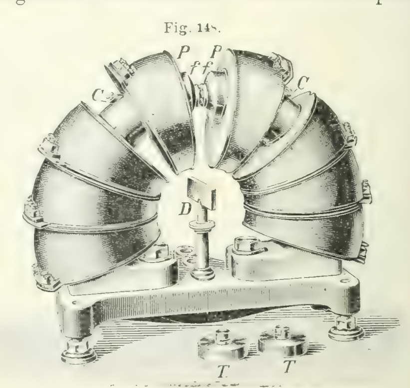
schuhe f f (zwei andere T T sieht man am Boden abgebildet) einfach angesetzt werden, so daß sie zwischen sich einen sehr engen — bis auf 1 mm Dicke herab — Zwischenraum lassen, der nun ein äußerst intensives magnetisches Feld bildet, wenn der Magnet erregt ist. Der Tisch D kann heraufgeschraubt werden, um Gegenstände in das starke Feld zu bringen.

Fig. 147.



Diese starken magnetischen Felder, deren Feldstärke bei dem Halbringelektromagneten auf die Größe 38000 gebracht werden kann, wenn die Horizontalintensität der Erde die Stärke 0,2 hat, kann man nicht in derselben Weise messen, wie das schwache Feld der Erde, durch Schwingungen eines Magnetstäbchens, schon aus dem Grunde, weil man ein solches nicht in das starke Feld hineinbringen kann, ohne daß es stark magnetisch induziert wird. Wir werden später bei den Induktionserscheinungen andere Mittel kennen lernen, um die Feldstärke solch starker Felder genau zu messen.

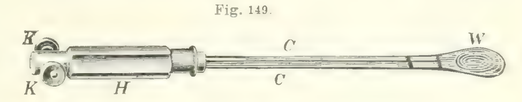
Fig. 148.



Es gibt aber auch eine Methode für die Messung, welche schon nach unseren bisherigen Kenntnissen verständlich und anwendbar ist. Es hat sich nämlich experimentell gezeigt, daß der elektrische Widerstand von Wismutdrähten ein anderer ist, wenn das Wismut in einem magnetischen Feld sich befindet, als wenn es nicht magnetisiert ist. Der Widerstand wächst in dem magnetischen Feld, und zwar angenähert im Verhältnis der Stärke desselben. Immer wenn die Stärke des Magnetfeldes um 1000 Einheiten (in unserem obigen Maß) zunimmt, wächst der Widerstand des Wismuts um 5% seines ursprünglichen Wertes. Man sieht, daß man daraus um-

gekehrt, wenn man nur die Widerstandsänderung eines Wismutdrahtes messend durch die Wheatstonesche Brücke verfolgt, die Stärke des Magnetfeldes bestimmen kann. Zu diesem Zwecke werden von Hartmann & Braun flache Wismutspiralen konstruiert, wie eine in Fig. 149 abgebildet ist. Der Wismutdraht ist bei W in eine flache Spirale gewickelt, welche zum Schutz gegen Zerbrechen mit Glimmerplatten bedeckt ist. Ihre Enden sind an Kupferstäbe CC angelötet, welche isoliert durch den Handgriff H hindurchgehen und die Anschlußklemmen KK für die Widerstandsmessung tragen. Die flache Spirale wird einfach in ein magnetisches Feld hineingestellt. Wenn man ein für allemal bestimmt hat, welchen Widerstand die Wismutspirale etwa bei den Feldstärken 100, 1000, 5000 u. s. w. besitzt, d. h. wenn man die Spirale geeicht hat, so kann man umgekehrt aus dem Widerstand die Feldstärke in unseren Einheiten sofort bestimmen.

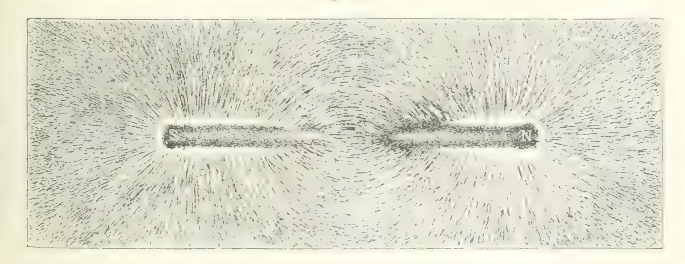
Fig. 149.



Für diese starken magnetischen Felder hat sich eine Darstellung und Bezeichnung zweckmäßig erwiesen, welche aus einem einfachen Experimente resultiert.

Legen wir nämlich einen Magnetstab irgendwo auf einen Tisch, bringen über denselben ein Blatt Papier und streuen auf dieses Eisenfeilspäne, so ordnen diese sich so, daß sich immer in der Richtung der magnetischen Kraft je zwei Feilspäne aneinander lagern. Ein Bild dieser Anordnung gibt Fig. 150. Eine jede solche Linie, in der die Eisenfeilspäne sich aneinander reihen, nennt man eine magnetische Kraftlinie. Man

Fig. 150

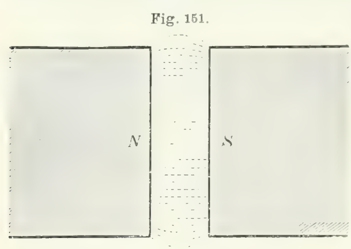


sieht von den Polen aus die Kraftlinien nach allen Richtungen ausstrahlen und zwischen den Polen vom Nordpol zum Südpol in krummen Linien übergehen. Man hat auf diese Weise ohne weiteres eine Darstellung von der Richtung der magnetischen Kraft im Felde, wenn man nur noch festsetzt, daß die Kraftlinien immer vom Nordpol in die Luft ausströmen und in den Südpol einströmen sollen. Wenn man einen magnetischen Nordpol für sich herstellen könnte — was aber nicht möglich ist, da jeder noch so kleine Magnet

zwei Pole hat —, so würde ein solcher Nordpol, wenn er in ein solches Feld gebracht werden und in ihm sich frei bewegen könnte, an jeder Stelle der Richtung einer Kraftlinie folgen. Er würde stets vom Nordpol abgestoßen und zum Südpol hingezogen werden.

In den engen Feldern zwischen zwei entgegengesetzten Magnetpolen sind die Kraftlinien im wesentlichen gerade Linien, welche vom Nordpol zum Südpol gehen. Nur an den Grenzen des Magnetfeldes sind die Kraftlinien gekrümmt. Fig. 151 stellt die Kraftlinien eines solchen Magnetfeldes dar. Man bezeichnet ein magnetisches Feld, in dem die Kraftlinien geradlinig verlaufen, als ein homogenes Magnetfeld.

Fig. 151.



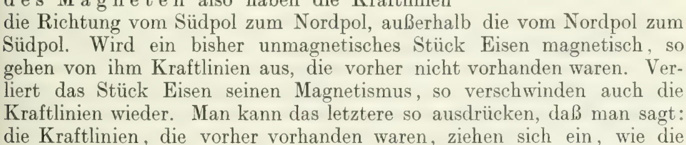
In einem solchen Felde wollen wir nun die Kraftlinien nicht in unbegrenzter Zahl, sondern in bestimmter Zahl zeichnen. Wir wollen nämlich durch jeden Quadratzentimeter des Feldes, der senkrecht zu den Kraftlinien steht, gerade so viel Kraftlinien zeichnen, als die Stärke des Feldes in obigen Einheiten beträgt. Also bei einem Feld von der Feldstärke 1000 würden wir durch jeden Quadratzentimeter 1000 solche Linien in der Richtung vom Nordpol zum Südpol zu zeichnen haben. In dem Feld unseres obigen Halbringmagneten, wenn es seine größte Stärke hat, müßten wir 38 000 solche Linien pro Quadratzentimeter zeichnen. Das magnetische Feld der Erde ist auch homogen, aber so schwach, daß wir dabei bloß auf je 2 qcm 1 Kraftlinie zu zeichnen hätten. Die ganze Intensität des Erdmagnetismus, die schief gegen den Horizont gerichtet ist, ist nämlich etwa 0,5, während die Horizontalintensität, deren Wert wir oben (S. 160) auf etwa 0,2 angegeben haben, nur ein Teil, eine Komponente der ganzen Intensität ist. Hat ein magnetisches Feld nicht überall dieselbe Intensität, so ist an den verschiedenen Stellen desselben auch die Zahl der Kraftlinien, die wir pro Quadratzentimeter zu zeichnen haben, verschieden. Man sieht, daß nach dieser Konstruktion es genau dasselbe bedeutet, ob wir sagen, das magnetische Feld hat an einer Stelle die Intensität oder Feldstärke 200, oder ob wir sagen, an dieser Stelle sind pro Quadratzentimeter 200 Kraftlinien vorhanden. Die Einführung der Zahl der Kraftlinien pro Quadratzentimeter, die zuerst etwas gesucht erscheint, bietet aber manche große Vorteile, wie sich namentlich im Kapitel 9 zeigen wird.

Wir wollen nun aus den uns schon bekannten Eigenschaften, die magnetische Körper zeigen, die Eigenschaften der Kraftlinien entnehmen. Zunächst ergibt sich ohne weiteres die folgende.

Bringt man in die Nähe des einen Pols eines Magnetstabes ein Stück weichen Eisens, so wird dieses induziert, und in dem Raum zwischen dem Magneten und dem induzierten Eisen ist die Feldintensität sehr groß, weit größer als an anderen Stellen in der Nähe des Magneten, weil sich eben dem Nordpol N gegenüber ein Südpol S bildet. Es verlaufen also in Fig. 152 die Kraftlinien zwischen dem Pol N und dem induzierten

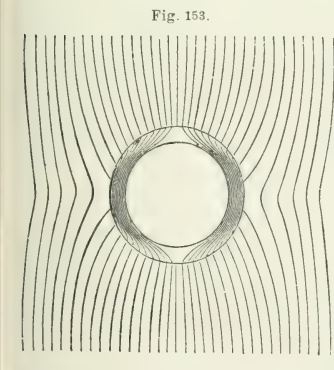
Eisenstück A viel dichter als im übrigen Feld. Wir können dies als eine Eigenschaft der Kraftlinien ausdrücken und sagen: weiches Eisen konzentriert die vorhandenen Kraftlinien des Feldes in sich. So werden auch in Fig. 153, wo ein Ring aus Eisen in einem von Kraftlinien durchzogenen Felde gezeichnet ist, die Kraftlinien in dem Eisenring konzentriert, sie biegen sich also in der Nähe desselben ab und durchsetzen ihn mit viel größerer Dichtigkeit, als sie außerhalb desselben haben. Da wo die Kraftlinien in weiches Eisen eindringen, erzeugen sie einen Südpol, wo sie das weiche Eisen verlassen, erzeugen sie einen Nordpol. Denn wir haben festgesetzt, daß die Kraftlinien eines Magneten immer vom Nordpol nach außen zum Südpol gehen sollen.

Fig. 152.



Die Kraftlinien, die von einem Magnetstab ausgehen, durchsetzen auch das Eisen des Magneten selbst, indem sie in diesem am Südpol eintreten und am Nordpol austreten. Innerhalb des Magneten also haben die Kraftlinien die Richtung vom Südpol zum Nordpol, außerhalb die vom Nordpol zum Südpol. Wird ein bisher unmagnetisches Stück Eisen magnetisch, so gehen von ihm Kraftlinien aus, die vorher nicht vorhanden waren. Verliert das Stück Eisen seinen Magnetismus, so verschwinden auch die Kraftlinien wieder. Man kann das letztere so ausdrücken, daß man sagt: die Kraftlinien, die vorher vorhanden waren, ziehen sich ein, wie die Fühlhörner einer Schnecke sich einziehen, sie wandern aus dem Raume, in dem sie vorher vorhanden waren, durch Einschrumpfung zurück, bis sie schließlich verschwunden sind. Umgekehrt, wenn Eisen magnetisiert wird, so kann man das so darstellen, als ob sich von dem Eisen aus allmählich immer mehr Kraftlinien vorstrecken. Diese Aussagen über die Kraftlinien lehren, wie man sieht, durchaus nichts Neues. Sie geben durchaus keine neue Erfahrungstatsache. Sie geben bloß eine andere und zwar für manche Zwecke vorteilhafte Ausdrucksweise für die schon bekannten Tatsachen.

Fig. 153.



Nicht bloß Eisenkörper werden durch magnetische Induktion magnetisch, sondern, freilich in viel geringerem Grade, auch Nickel und Kobalt und in noch geringerem Grade die meisten anderen Körper, ja auch die Luft und andere Gase. Auch dies ist eine der großen Entdeckungen Faradays, daß er zeigte, daß der Magnetismus eine allgemeine Eigenschaft aller Körper ist, daß alle Substanzen denjenigen Zustand annehmen können, den wir eben Magnetismus nennen und der beim Eisen so überaus kräftig zutage tritt. Wenn daher ein Magnet vorhanden

ist, welcher nach allen Richtungen magnetische Kräfte ausübt, und wenn in seine Nähe ein Stück weichen, unmagnetischen Eisens gebracht wird, so wird das sehr stark magnetisch, es konzentriert die Kraftlinien zum größten Teil in sich. Aber ein Teil der magnetischen Kräfte des Magneten wirkt auch außerhalb des Eisens auf die Luft oder die anderen vorhandenen Körper; die magnetische Induktion ist nicht ganz auf das Eisen konzentriert. Es findet, wie man sagt, eine gewisse Streuung der Kraftlinien statt. Um also die Kraft eines Magneten an bestimmter Stelle möglichst auszunutzen, muß man Anordnungen treffen, daß diese Streuung möglichst gering ist, d. h. daß die magnetischen Kräfte möglichst auf den Raum konzentriert werden, in dem sie gebraucht werden sollen.

Wir gehen nun zu der Betrachtung unserer Elektromagnete zurück, welche uns viel mehr und neues lehren als die permanenten Stahlmagnete, weil wir ja bei den letzteren die Stärke des Magneten nicht zu ändern imstande sind, während wir bei den Elektromagneten dies durch Verstärkung und Schwächung des magnetisierenden Stromes in weitem Umfang tun können.

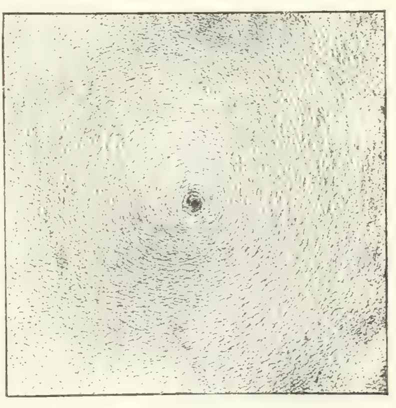
Wenn wir bei einem Elektromagneten den Strom unterbrechen, hört der Magnetismus des Eisens auf. Doch ist das nicht ganz streng richtig. Es dauert nämlich immer eine gewisse kleine, aber meßbare Zeit, bis der Magnetismus aus dem Eisenkern verschwunden ist. Man nimmt zur Erklärung der magnetischen Erscheinungen an, daß in jedem, auch unmagnetischen, Eisenstücke die Moleküle stets von vornherein selbst magnetisch sind, daß sie aber alle ganz verschiedene Lagen und Richtungen haben, und daß die Wirkung der Magnetisierung, mag sie nun durch Bestreichen mit einem Magneten oder durch Herumführen eines Stromes hervorgebracht sein, darauf beruht, daß alle Moleküle des Eisens sich in dieselbe Richtung stellen. Ein Magnet wäre demnach ein Stück Eisen, bei welchem alle Moleküle gleich gerichtet sind. Es wird weiter angenommen, daß bei gewöhnlichem weichen Eisen die Moleküle infolge einer äußeren magnetisierenden Kraft sich ohne weiteres in ihre neuen Lagen einstellen, daß dagegen beim Stahl es nicht leicht ist, diese Richtungsänderung hervorzubringen. Die Stahlmoleküle hängen so fest miteinander zusammen, daß jeder Richtungsänderung eine erhebliche Kraft entgegenwirkt, die man Koerzitivkraft nennt. Wenn das der Fall ist, so ist es einleuchtend, daß ein Stück Stahl nicht leicht magnetisiert werden kann, sondern daß dies nur durch lange dauernde Einwirkung von magnetisierenden Kräften geschehen kann. Ebenso ist es aber auch einleuchtend, daß, wenn ein Stahlstück magnetisiert ist, es magnetisch bleiben muß. Denn die Koerzitivkraft hindert die Moleküle, wieder in ihre alten unregelmäßigen Lagen zurückzukehren, sie bleiben also gleich gerichtet, das Stahlstück bleibt magnetisch. Anders ist es bei dem weichen Eisen. Bei diesem ist die Koerzitivkraft sehr gering, fast verschwindend. Infolgedessen wird weiches Eisen sofort magnetisch, wenn eine magnetisierende Kraft auf dasselbe wirkt, infolgedessen wird es aber auch bald wieder unmagnetisch, wenn die magnetisierende Kraft aufhört. Da aber auch weiches Eisen nicht ganz ohne Koerzitivkraft ist, so wird es auch nicht sofort in voller Stärke magnetisch, wenn der magnetisierende Strom geschlossen

wird, sondern die volle Stärke entwickelt sich erst in einiger Zeit, die allerdings nur ein Bruchteil von einer Sekunde ist. Ebenso wird es auch nicht sofort nach dem Aufhören des magnetisierenden Stromes ganz unmagnetisch, sondern es verliert seinen Magnetismus erst allmählich, wenn auch in sehr kurzer Zeit.

Damit hängt eine bemerkenswerte Tatsache zusammen. Wenn man den Strom, der um einen weichen Eisenstab spiralförmig herumgeführt ist, allmählich verstärkt, so wird das Eisen entsprechend immer stärker magnetisch, und wenn man den Strom dann allmählich wieder abnehmen läßt, so wird es wieder schwächer magnetisch. Aber, und das ist das Neue, auf dem Hinweg und auf dem Rückweg durchläuft es nicht dieselben Werte. Bei gleicher magnetisierender Stromstärke ist der erzeugte Magnetismus ein kleinerer bei aufsteigendem (stärker werdendem) Strom als bei absteigendem Strom. Es kommt das eben daher, daß bei aufsteigendem Strom sich die Koerzitivkraft der Magnetisierung entgegenstellt, bei absteigendem, schwächer werdendem Strom aber der Entmagnetisierung. Diese Erscheinung nennt man H y s t e r e s i s des Eisens (von ὑστερεῖν, hysterein, nachbleiben). Es tritt diese Eigenschaft bei vielen Anwendungen von Elektromagneten störend auf und man muß mit dieser Eigenschaft selbst des weichsten Eisens in manchen Fällen rechnen.

Man kann sich den Vorgang so vorstellen, als ob die Moleküle des Eisens bei ihrer Drehung, bei ihrer Richtungsänderung sich aneinander reiben und dadurch verhindert werden, der einwirkenden Kraft sofort zu folgen. Bei jeder Reibung aber, bei jedem Überwinden eines Widerstandes wird bekanntlich W ä r m e entwickelt. Es muß daher auch in weichem Eisen durch das Magnetisieren und Entmagnetisieren Wärme entwickelt werden. Wird der Strom nur einmal geschlossen und dadurch der Magnetismus in dem Eisen erregt, so ist diese Erwärmung des Eisens unmerkbar. Wenn aber der Strom sehr rasch hintereinander geschlossen und geöffnet, wieder geschlossen und wieder geöffnet wird, so daß der Magnetismus des Elektromagneten sich fortwährend rasch hintereinander ändert, so wird infolge der Hysteresis jedesmal eine gewisse, wenn auch kleine Wärmemenge erzeugt, und diese kleinen Mengen summieren sich alle, so daß schließlich die Temperatur des Eisens ganz erheblich gesteigert wird, daß das Eisen sich sehr stark erhitzt. Es ist dies ein Übelstand, der bei den elektrischen Maschinen störend auftritt, wie wir später sehen werden.

Fig. 154.



Die Tatsache, daß ein elektrischer Strom magnetisierend auf wei-

ches Eisen wirkt, zwingt notwendig zu der Annahme, daß ein Strom in seiner Umgebung ganz ebenso magnetische Kräfte ausübt wie ein Magnet.

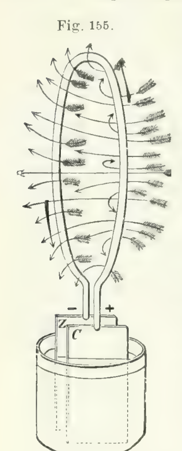


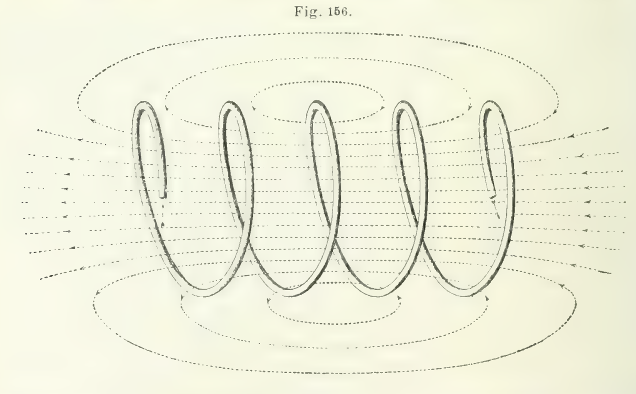
Fig. 155.

Wenn das der Fall ist, so muß man auch mittels Eisenfeile die magnetischen Kraftlinien eines Stromes erhalten können, wie man sie bei einem Magnetstab erhält. Das ist in der Tat möglich. Wenn man in Fig. 154 einen geradlinigen Draht durch die Ebene des Papiers senkrecht hindurchsteckt und einen starken Strom durch ihn hindurchsendet, so ordnen sich Eisenfeilspäne, die auf das Papier gestreut sind, so an, wie es die Figur zeigt, d. h. die magnetischen Kraftlinien des Stromes sind Kreise um den Draht herum.

Um jedes Stück eines Stromkreises herum sind also die magnetischen Kraftlinien Kreise. Hat man daher einen geschlossenen Kreisstrom, wie Fig. 155, so haben um jeden Teil des Drahtes herum die Kraftlinien die Richtung der kleinen Pfeile, also sie durchschneiden die durch den Stromkreis begrenzte Ebene senkrecht, wie es die großen Pfeile anzeigen, d. h. die Kraftlinien gehen durch die Ebene des Stromkreises senkrecht hindurch.

Nehmen wir weiter eine Drahtspirale, wie Fig. 156, so gehen aus demselben Grunde die Kraftlinien im wesentlichen parallel der Achse der Spirale hindurch. Im Inneren einer stromdurchflossenen Drahtspule ist also ein homogenes Magnetfeld (S. 166) vorhanden. Die Kraftlinien schließen sich außerhalb wieder zu

Fig. 156.



geschlossenen Figuren. Diese Kraftlinien müssen, wie es Kraftlinien immer tun, jedes Stück Eisen, in das sie eindringen, magnetisieren, wie es tatsächlich geschieht. Man nennt häufig eine solche Drahtspirale ein Solenoid (von σωλήν, solen, Windung).

Die Intensität des magnetischen Feldes in einer solchen Spule ist um

so größer, je mehr Windungen die Spirale auf 1 cm Länge hat und je stärker der Strom ist, der durch sie fließt. Drückt man die Stromstärke in Ampere aus, so bezeichnet man gewöhnlich das Produkt aus der Zahl der Windungen des Solenoids pro 1 cm Länge und der Stromstärke als die Zahl der Amperewindungen und kann also sagen, die Feldstärke im Inneren eines Solenoids ist um so größer, je größer die Zahl der Amperewindungen ist. Man hat nun absichtlich die Einheiten, in denen man Feldstärken mißt, und die Stromeinheit, 1 Ampere, in solchen Zusammenhang gebracht, daß die magnetische Feldstärke im Inneren einer solchen Spule (die überall, außer in der Nähe der Ränder, dieselbe ist) gerade gleich $\frac{5}{4}$mal der Zahl der Amperewindungen ist (genauer ist der Faktor nicht $\frac{5}{4}$, sondern $\frac{4\pi}{10} = 1{,}2566$). Da wir nun die Zahl der magnetischen Kraftlinien, die wir pro Quadratzentimeter zeichnen, stets gleich der Feldstärke an der betreffenden Stelle machen wollten, so können wir sofort angeben, wie viel Kraftlinien wir in einer solchen Stromspule haben. Hat z. B. die Spule auf jeden Zentimeter Länge 10 Windungen und wird sie von einem Strom von 4 Ampere durchflossen, so ist die Zahl der Amperewindungen 40 und die Zahl der Kraftlinien pro Quadratzentimeter ist 50. Wir haben also durch jeden Quadratzentimeter 50 Kraftlinien zu legen. Die Gesamtzahl der Kraftlinien, die wir so zu zeichnen haben, hängt natürlich von dem Querschnitt der Spule ab. Ist dieser z. B. 6 qcm, so haben wir im ganzen 300 Kraftlinien im Inneren der Spule.

Bringen wir nun in die Spule einen Stab von weichem Eisen, so wird dieser infolge der magnetisierenden Kraft selbst zu einem Magneten, entwickelt also für sich noch besonders Kraftlinien, und die Zahl der Kraftlinien, die jetzt durch die Spule, d. h. durch den Eisenkern hindurchgehen, wird bedeutend größer, weil eben das magnetische Eisen selbst je nach der Stärke seines Magnetismus mehr oder weniger Kraftlinien enthält oder aussendet. Die verschiedenen Eisensorten unterscheiden sich sehr wesentlich darin, in welchem Verhältnis sie die Zahl der Kraftlinien des Solenoids vergrößern. So hat sich z. B. durch Experimente folgender Zusammenhang ergeben für die Zahl der Amperewindungen einer Magnetisierungsspule (also für deren magnetisierende Kraft) einerseits, und andererseits für die Zahl der Kraftlinien pro Quadratzentimeter, die dadurch in den betreffenden Eisenkörpern entstehen. Und zwar sind in folgender Tabelle drei Sorten von Eisen enthalten, die man als Schmiedeeisen, Stahlguß und Gußeisen bezeichnet. Außerdem ist die Zahl der Kraftlinien in der leeren Spule angegeben.

Zahl der Amperewindungen	Zahl der Kraftlinien in der leeren Spule	Zahl der Kraftlinien pro 1 qcm		
		Schmiedeeisen	Stahlguß	Gußeisen
5	6,25	9000	11000	—
10	12,5	12000	13500	2300
15	18,75	13300	14500	3900
20	25	14400	15000	5000
25	31,25	14900	15500	5600
30	37,5	15300	15800	6200

Man sieht, daß die Zahl der Kraftlinien pro Quadratzentimeter, also die Stärke der Magnetisierung, bei gleicher Amperewindungszahl für Stahlguß größer ist als für Schmiedeeisen und für beide bedeutend größer ist als für Gußeisen.

Man bezeichnet das Verhältnis, in welchem die Zahl der Kraftlinien der Spule nach Einbringung des Eisenkerns zu der Zahl der Kraftlinien in der leeren Spule steht, als die magnetische Leitungsfähigkeit des betreffenden Eisens. Häufig braucht man auch dafür den Ausdruck magnetische Permeabilität.

Wir können aus unseren obigen Zahlen diese Permeabilität für diese drei Eisensorten berechnen. Dadurch erhalten wir folgende Tabelle:

Zahl der Amperewindungen	magnetische Leitungsfähigkeit		
	Schmiedeeisen	Stahlguß	Gußeisen
5	1440	1760	—
10	960	1080	184
15	709	773	208
20	576	600	200
25	477	496	179
30	408	421	165

Man sieht, daß die magnetische Leitungsfähigkeit der verschiedenen Eisensorten nicht eine unveränderliche Größe ist, wie die elektrische Leitungsfähigkeit der Metalle, sondern daß sie um so kleiner wird, je stärker die magnetisierenden Kräfte sind, die auf das Eisen wirken. Der Magnetismus, den Eisenkörper annehmen, wächst also nicht proportional mit der magnetisierenden Kraft, sondern viel langsamer und nähert sich einer Grenze, über die er nicht hinausgeht.

Man kann in demselben Sinne auch von der magnetischen Leitungsfähigkeit anderer Körper als des Eisens sprechen. Für diese, z. B. die Luft oder Kupfer, ist die Leitungsfähigkeit aber offenbar gleich 1, weil sie eben die Zahl der Kraftlinien nicht vermehren, wenn man sie in die Spule bringt. Nur Nickel und Kobalt haben etwas größere Leitungsfähigkeiten als 1.

Diese Anschauungsweise, die zunächst etwas gezwungen aussieht, wird uns aber nun zu einer wichtigen neuen Auffassung der magnetischen Erscheinungen führen.

Nehmen wir einen geschlossenen Eisenring und umwickeln wir ihn ganz mit Draht. Durch den Draht fließe ein Strom. Dann ist es die Zahl der Amperewindungen, welche die magnetischen Kraftlinien hervorbringt. Je größer die Leitungsfähigkeit des Eisens, je größer der Querschnitt des Ringes, je stärker der Strom ist, und je mehr Windungen auf 1 cm Länge gehen, um so mehr Kraftlinien gehen durch den Ring hindurch. Es gehen aber bei gegebener Gesamtzahl der Windungen um so mehr auf 1 cm Länge, je kleiner die Länge des Ringes (in der Mittellinie gemessen) ist. Man kann daher hier ein ganz analoges Gesetz aufstellen, wie es das Ohmsche Gesetz bei einem elektrischen Strome ist. Bezeichnen wir nämlich die gesamte Zahl der Amperewindungen unseres Ringes, welche ja den Magnetismus erst erzeugt, als die magnetomotorische Kraft (diese Zahl ist wie oben mit $\frac{5}{4}$ zu multiplizieren, um in Übereinstimmung

mit den einmal festgestellten magnetischen Maßen zu sein) und bezeichnen wir diejenige Größe, welche von der Leitungsfähigkeit, dem Querschnitt und der Länge des Ringes abhängt, als den magnetischen Widerstand des Ringes, so können wir sagen: die Zahl der Kraftlinien in unserem Ring ist gleich der magnetomotorischen Kraft dividiert durch den magnetischen Widerstand:

$$\text{Zahl der Kraftlinien} = \frac{\text{magnetomotorische Kraft}}{\text{magnetischer Widerstand}}.$$

Dieses Gesetz nennt man das Ohmsche Gesetz für den Magnetismus. Was in dem gewöhnlichen Ohmschen Gesetz die Stromstärke ist, das ist hier bei dem magnetischen Gesetz die Zahl der Kraftlinien.

Der magnetische Widerstand eines Ringes verhält sich ganz ebenso wie der elektrische Widerstand eines Drahtes; er ist nämlich um so größer, je größer die Länge des Ringes, je kleiner der Querschnitt und je kleiner die Leitungsfähigkeit (für die betreffende Größe der Amperewindungszahlen genommen) ist:

$$\text{magnetischer Widerstand} = \frac{\text{Länge}}{\text{Querschnitt} \times \text{magnet. Leitungsfähigkeit}}.$$

Ganz ebenso war der

$$\text{elektrische Widerstand} = \frac{\text{Länge}}{\text{Querschnitt} \times \text{elektr. Leitungsfähigkeit}}.$$

Zunächst gilt dieses Gesetz des Magnetismus nur für einen geschlossenen Eisenring, weil nur bei diesem tatsächlich alle Kraftlinien im Inneren des Ringes verlaufen. Man kann aber mit großer Genauigkeit dasselbe Gesetz auch auf nahezu geschlossene magnetische Kreise anwenden, wenn man nur für den magnetischen Widerstand jedesmal die richtigen Werte annimmt. Betrachten wir z. B. in Fig. 157 den Eisenring, welcher an der Stelle SN aufgeschnitten ist, so daß dort eine Luftschicht sich befindet und daß der Ring dort zwei freie Pole hat.

Die Kraftlinien verlaufen in der Luftschicht, wie es die Figur zeigt, im wesentlichen geradlinig zwischen N und S und biegen sich nur wenig nach außen. Sie bauchen sich um so weniger aus, je enger die Luftschicht ist. Wir können nun für diesen Fall den magnetischen Widerstand berechnen, indem wir ihn aus zwei Teilen zusammensetzen. Es ist nämlich

$$\begin{aligned}\text{der ganze magnetische Widerstand} &= \text{magnet. Widerstand des Eisens}\\ &+ \text{magnet. Widerstand der Luft.}\end{aligned}$$

Wir wollen mit bestimmten Zahlen rechnen. Es sei der Querschnitt des Ringes 5 qcm, die Länge des ganzen Ringes (d. h. die Länge der Mittellinie) 60 cm, die Länge der Luftschicht sei 1 cm. Die Leitungsfähigkeit des Eisens sei 1000. Wenn dann der Ring ohne Unterbrechung wäre, so

$$\text{wäre sein magnetischer Widerstand} = \frac{60}{5 \,.\, 1000} = 0{,}012.$$

Da er unterbrochen ist, so ist sein

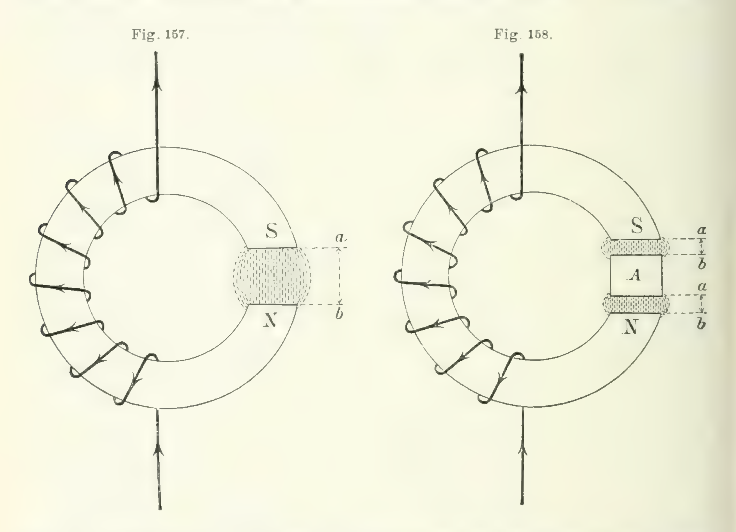
$$\text{magnetischer Widerstand} = \frac{59}{5 \,.\, 1000} + \frac{1}{5} = 0{,}0118 + 0{,}2 = 0{,}2118.$$

Man sieht, daß der magnetische Widerstand infolge der vorhandenen Luftschicht etwa 17,7mal so groß geworden ist, so daß die Zahl der Kraftlinien im zweiten Fall um das 17,7fache abgenommen hat, gegenüber der im ersten Fall.

Nehmen wir weiter den komplizierteren Fall, der in Fig. 158 dargestellt ist. Darin befindet sich innerhalb der Luftschicht wieder ein Stück Eisen A, welches in dem Felde induziert wird. Wir wollen annehmen, das Eisen A habe die Länge 0,8 cm, jede der beiden Luftschichten die Länge 0,1 cm. Dann ist der

$$\text{magnetische Widerstand} = \frac{59}{5\,.\,1000} + \frac{0,8}{5\,.\,1000} + 2\,.\,\frac{0,1}{5} = 0,05196,$$

also mehr als 4mal so groß wie im Falle eines ganz geschlossenen Ringes. Wenn also durch den ganz geschlossenen Eisenring etwa 17 000 Kraft-



linien hindurchgehen, so gehen im Falle der Fig. 157 bloß etwa 1000, und im Falle der Fig. 158 etwa 4000 Kraftlinien durch den ganzen Kreis hindurch.

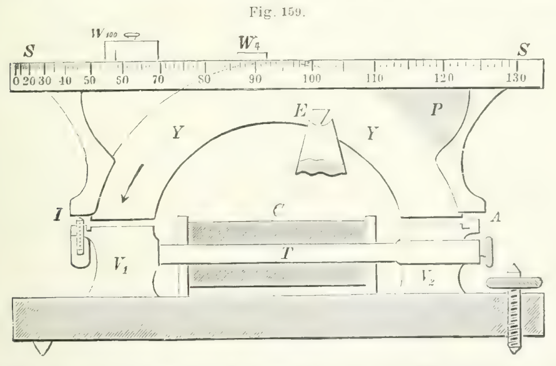
Man kann auch umgekehrt fragen, wie groß in diesen drei Fällen die Zahl der Amperewindungen sein muß, um jedesmal die gleiche Zahl der Kraftlinien, etwa 17 000, hervorzubringen. Nach dem Ohmschen Gesetz für den Magnetismus braucht man im ersten Fall eine magnetomotorische Kraft von $17\,000 \times 0,012 = 204$, welche $\frac{4}{5}\,.\,204 = 165$ Amperewindungen entspricht, im zweiten Fall ca. 17mal so viel, also etwa 2800, im dritten Fall ca. 4mal so viel, also etwa 700 Amperewindungen. Man sieht, wie stark man die gesamte Zahl der Amperewindungen ver-

größern muß, um trotz des Luftspalts die gleiche Stärke der Magnetisierung des Eisens zu erzielen.

Dieses Ohmsche Gesetz für den Magnetismus wird bei der Berechnung von Dynamomaschinen, wo man es immer mit nahezu geschlossenen Kreisen zu tun hat, allgemein angewendet.

Aus der vollständigen Ähnlichkeit, die der magnetische Widerstand von Eisensorten mit dem elektrischen Widerstand von Drähten hat, ergibt sich nun auch, daß man verschiedene Eisensorten miteinander in bezug auf ihre magnetische Leitungsfähigkeit (Permeabilität) ganz ähnlich vergleichen kann, wie man verschiedene Drähte auf ihre elektrische Leitfähigkeit vergleicht. Ein naheliegendes Mittel dazu wäre, daß man magnetische Stäbe in derselben Weise anordnet, wie man es bei elektrischen Widerständen in der Wheatstoneschen Brücke tut. Indes zeigt sich hier, bei den magnetischen Messungen, doch ein wesentlicher Unterschied gegenüber den elektrischen Messungen. Die Luft nämlich ist bei elektrischen Messungen als ein vollkommener Isolator zu betrachten, ihr Widerstand ist millionenfach größer als der eines gleich langen Metalls. Das ist aber in bezug auf den Magnetismus nicht der Fall. Das beste magnetische Eisen leitet den Magnetismus nur ca. 2000- bis 3000mal so gut wie die Luft. Wenn daher ein Eisenstück in der Luft sich befindet und man Anordnungen trifft, daß magnetische Kraftlinien in das Eisenstück eindringen, so gehen immer auch Kraftlinien in die umgebende Luft. Das Analogon hätten wir bei der Elektrizität, wenn wir einen Kupferdraht, durch den wir den Strom senden wollen, nicht in der Luft ausspannen, sondern etwa in Quecksilber oder in einer sehr gut leitenden Salzlösung. Dann würde auch immer ein Teil des Stromes durch das Quecksilber oder durch die Salzlösung gehen, welche parallel zum Kupferdraht geschaltet ist, also im Nebenschluß zu ihm liegt. Ganz so liegt bei magnetischen

Fig. 159.

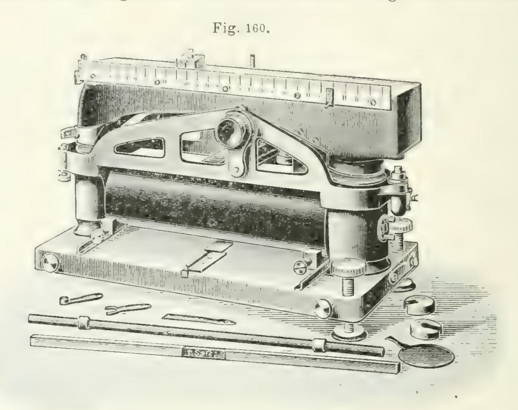


Messungen die Luft immer im Nebenschluß zu den Eisenstäben, und man darf daher ihren Einfluß auf die Messungen nicht vernachlässigen.

Durch geeignete Anordnungen gelingt es aber doch, auf verhältnismäßig bequemem Wege die magnetische Leitungsfähigkeit verschiedener

Eisensorten zu bestimmen, und zwar für verschieden große magnetisierende Kräfte, da ja die Leitungsfähigkeit des Eisens von diesen abhängt. Ein für derartige Messungen sehr geeigneter Apparat ist die magnetische Wage von Du Bois, von der Fig. 159 eine schemati-

Fig. 160.



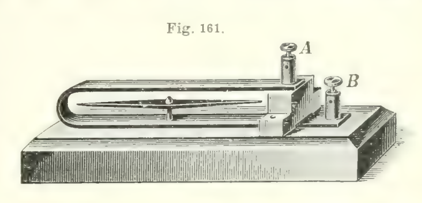
sche Zeichnung und Fig. 160 die Ansicht gibt. Das zu untersuchende Eisen wird in Form eines Stabes von 15 cm Länge und 1 qcm Querschnitt abgedreht und bildet dann — das ist das Prinzip des Instruments — den einen Teil eines vollständigen magnetischen Kreises. Der Eisenstab, in der Figur ist er mit T bezeichnet, wird zu dem Ende zwischen die Eisenbacken V_1 und V_2 geklemmt und befindet sich dabei im Inneren einer Drahtspule C, durch welche Ströme zwischen 0 und 30 Ampere gesendet werden. Über den Backen V_1 und V_2 kann sich ein kreisförmiges eisernes Joch Y Y mit geringem Spielraum um die Achse E drehen. Die Achse liegt nicht symmetrisch zu dem Joch. Um das Gleichgewicht zu erhalten, ist rechts ein Bleiklotz P als Ausgleich angebracht. Durch die Schraube *I* und den Anschlag A ist die Bewegung des Jochs begrenzt. Wenn nun das Joch im Gleichgewicht ist, solange kein Strom durch C fließt, so muß es sich doch sofort nach links, in der Richtung des Pfeiles drehen, wenn ein Strom durchgesendet wird. Dann wird nämlich T mit den Backen V_1 und V_2 magnetisch und sie ziehen das induzierte Joch an. Obwohl dieses nun symmetrisch induziert wird, so muß es sich doch drehen, weil eben der Drehpunkt exzentrisch liegt, also die Hebelarme ungleich sind. Durch Verschiebung eines Laufgewichtes W_{100} von 100 g Gewicht oder bei kleinen Kräften eines anderen W_4 von 4 g Gewicht kann man nun das Joch wieder zum Einspielen bringen. Das Laufgewicht kompensiert also die magnetische Anziehung. Die magnetische Anziehung ist aber von dem magnetischen Moment des Stabes abhängig. Dadurch ist das magnetische Moment und daher auch die magnetische Leitungsfähigkeit des betreffenden Eisens leicht zu messen.

Die bisher besprochene Magnetisierung von Eisen durch elektrische

Ströme ist aber nur e i n e der magnetischen Wirkungen des galvanischen Stromes.

Wir haben schon häufig provisorisch von den Eigenschaften der Galvanoskope und Galvanometer Gebrauch gemacht, um aus diesen das Vorhandensein und die Stärke eines elektrischen Stromes zu erkennen und zu messen. O e r s t e d t , Professor in Kopenhagen, war es, welcher zum ersten Male die Beobachtung machte, daß unter dem Einfluß eines elektrischen Stromes eine in der Nähe befindliche Magnetnadel aus ihrer natürlichen Richtung, der Nord-Südrichtung, abgelenkt wurde. Leitet man durch den kupfernen Bügel in Fig. 161 mittels der beiden Klemmschrauben einen galvanischen Strom, so wird die innerhalb des Bügels befindliche Magnetnadel abgelenkt. Sie wird auch abgelenkt, wenn sie oberhalb und unterhalb oder zur Seite des vom Strome durchflossenen Bügels sich befindet. Dies war die Grundentdeckung von Oerstedt. Die wichtigsten Fragen bei dieser Erscheinung sind nun offenbar die beiden: 1. nach welcher Richtung wird die Magnetnadel durch einen Strom abgelenkt? 2. von welchen Umständen hängt die Größe der Ablenkung ab?

Fig. 161.



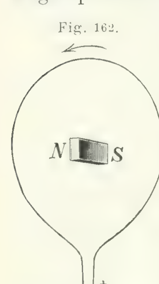
Bei jeder Umkehrung der Richtung des Stromes wird auch die Nadelablenkung umgekehrt. Ging der Nordpol der Nadel das eine Mal nach vorn aus dem Bügel heraus, so geht er beim Umkehren des Stromes nach hinten aus dem Bügel heraus. Die R i c h t u n g , nach welcher eine Magnetnadel abgelenkt wird, hängt also von der Richtung des Stromes ab, der auf sie wirkt. Nun hat Ampère gefunden, daß hierbei ganz dieselbe Schwimmerregel gilt, welche bei der Magnetisierung von Eisenkörpern gültig war (S. 162). D e n k t m a n s i c h i n d e r R i c h t u n g d e s p o s i t i v e n S t r o m e s s c h w i m m e n d , m i t d e m G e s i c h t d e r M a g n e t n a d e l z u , s o w i r d d e r N o r d p o l d e r M a g n e t n a d e l n a c h l i n k s a b g e l e n k t .

Die Kraft also, welche der Strom auf eine drehbar befestigte Magnetnadel ausübt, ist eine d r e h e n d e. Der Strom übt, wie man sagt, ein Drehungsmoment auf die Nadel aus. Dieses Drehungsmoment sucht die Nadel stets s e n k r e c h t z u d e m S t r o m zu stellen. Wir wissen (S. 170), daß die magnetischen Kraftlinien einer solchen Stromschleife, wie in Fig. 155, senkrecht zu der Ebene des Stromkreises stehen. Gerade in diese Richtung, in die Richtung der Kraftlinien des Stromes, sucht sich die Magnetnadel einzustellen. Sie kann aber diesem Streben nicht ganz folgen, weil sie unter dem Einfluß zweier Kräfte steht. Erstens wirkt auf sie der Erdmagnetismus, welcher sie immer in die bestimmte Süd-Nordrichtung zu zwingen sucht. Zweitens wirkt auf sie der Strom, welcher sie aus dieser Richtung abzulenken sucht. Wäre der Erdmagnetismus nicht vorhanden, so würde der schwächste Strom schon die Magnetnadel so drehen, daß sie senkrecht zu der Richtung des Stromes steht. Da der

Erdmagnetismus aber die Nadel in der Nord-Südrichtung zu halten und, wenn sie aus dieser abgelenkt ist, sie in dieselbe zurückzudrehen sucht, so ist die Ablenkung der Nadel aus der Nord-Südrichtung nur so groß, daß die Drehung, die der Erdmagnetismus hervorbringt, und die Drehung, die der Strom herbeiführt, sich das Gleichgewicht halten.

Die Größe der drehenden Kraft, welche von einem Strom auf einen Magneten ausgeübt wird, und überhaupt die Größe der magnetischen Wirkungen eines Stromes hängt, wie experimentelle Untersuchungen gezeigt haben, direkt ab von der Stärke des Stromes. Unter sonst gleichen Umständen übt ein Strom von 2 Ampere Stärke eine doppelt so große magnetische Kraft aus, wie ein Strom von 1 Ampere. Ferner aber hängt die Größe der Kraft auch ab von der Lage und Entfernung des Stromes von dem Magneten. Um das Gesetz dafür aussprechen zu können, können wir uns am einfachsten folgender Vorstellung bedienen. Wir denken uns einen geschlossenen Kreisstrom, in welchem der Strom eine bestimmte Stärke hat. Dieser Stromkreis umschließt eine Fläche von gewisser Größe. Die gesamte Kraft nun, die dieser Stromkreis auf einen Magnetpol ausübt, ist gerade so groß und hat gerade dieselbe Richtung, wie die Kraft, welche ein kurzer Magnetstab ausüben würde, der senkrecht durch die Fläche des Kreises hindurchgesteckt gedacht werden kann. Und dabei muß das magnetische Moment dieses gedachten Magnetstabes (oben S. 158) so bemessen sein, daß es gleich dem Produkt aus der Stärke des Stromes und der von ihm umschlossenen Fläche ist. Die Wirkung des Stromkreises ist genau dieselbe, wie die des so konstruierten Magneten. Dabei liegt der Nordpol dieses kurzen Magneten auf derjenigen Seite der Fläche, von der aus gesehen der Strom die Fläche umgekehrt wie ein Uhrzeiger umkreist. In Fig. 162 ist ein solcher Magnet in den Stromkreis eingezeichnet. Dieses Gesetz der elektromagnetischen Wirkung eines Stromes nennt man das Biot-Savartsche Gesetz. Dieses läßt sich daher folgendermaßen aussprechen:

Fig. 162.



Die magnetische Kraft, die ein Stromkreis ausübt, ist gleich der Kraft, welche ein kurzer Magnetstab ausüben würde, der senkrecht durch die Fläche des Stromkreises hindurchgesteckt ist und dessen Moment gleich dem Produkt aus der Stärke des Stromes und der Größe der vom Strom umflossenen Fläche ist.

Aus diesem Gesetz folgt sofort, daß eine drehbar aufgehängte Magnetnadel sich senkrecht zu der Fläche des Stromes zu stellen suchen muß. Denn eine Magnetnadel sucht sich in dieselbe Richtung zu stellen, wie der auf sie wirkende Magnet, und der Magnet, der den Strom ersetzt, hat ja seine Achse senkrecht zur Fläche des Stromes.

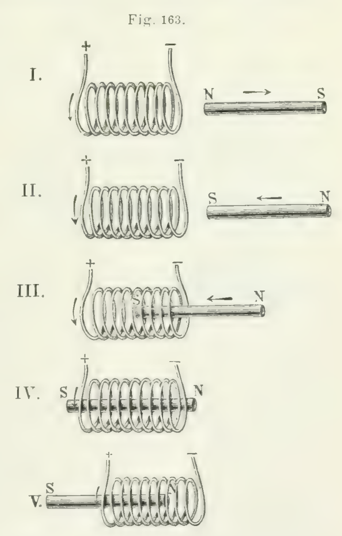
Bei dieser Fassung des Biot-Savartschen Gesetzes ersetzen wir also einen Strom durch einen Magneten von bestimmtem magnetischen Moment. Da wir nun die magnetischen Momente in bestimmtem Maß ausgedrückt

haben, so ist damit nun auch die Einheit der Stromstärke, in der alle Stromstärken gemessen werden sollen, in bestimmter Weise festgesetzt, und die auf diese Weise definierte Einheit nennt man die elektromagnetische Einheit der Stromstärke. Diese Einheit ist gleich 10 Ampere, also gleich einem Dekaampere und unsere praktisch gebrauchte Stromeinheit, 1 Ampere, ist also der zehnte Teil dieser (absoluten) Einheit und gerade das Biot-Savartsche Gesetz war der Grund, daß diese praktische Einheit für die Stromstärke gewählt wurde.

Aus dieser Auffassung, daß sich ein Stromkreis ganz wie ein Magnet verhält, der senkrecht durch die Fläche des Stromkreises gesteckt ist, und daß durch ihn Kraftlinien in bestimmter Menge hindurchgehen, lassen sich nun sämtliche elektromagnetischen Wirkungen leicht erklären. Diese Wirkungen werden stärker und treten deutlicher hervor, wenn man dem Stromkreis die Form einer Spirale gibt, die man als eine Anzahl von hintereinanderliegenden Kreisströmen ansehen kann. Nur der eine Unterschied herrscht zwischen einer Stromspule und einem Magneten, daß bei dem letzteren eben das Innere unzugänglich ist, während in den Hohlraum der Spule andere Körper hineindringen können.

Die beiden Enden einer Stromspule verhalten sich wie die beiden Pole eines Magnets, und zwar ist dasjenige Ende ein Nordpol, um welches der Strom im umgekehrten Sinne des Uhrzeigers fließt. In Fig. 163 sind Spulen gezeichnet, deren Enden mit dem + und — Pol der Batterie verbunden sind, so daß der Strom in ihnen in dem durch einen Pfeil angegebenen Sinne fließt. Dabei zirkuliert der Strom um das — Ende der Spule umgekehrt wie der Uhrzeiger sich dreht, das — Ende verhält sich also wie ein Nordpol. Die Kraftlinien der Spule gehen also von dem — Ende nach außen, treten in das + Ende ein und gehen durch die Spule hindurch in der Richtung vom + Ende zum — Ende. Wird nun ein Magnetstab N S so wie in Fig. 163 der Spule gegenübergestellt, so gehen bei diesem ja auch die Kraftlinien von N aus nach außen, und diese treffen auf die entgegengesetzt gerichteten der Spule, stauen sich und bewirken, daß der Magnet abgestoßen wird. In Fig. II dagegen treffen die gleichgerichteten Kraftlinien vom — Ende und die in S eintretenden Kraftlinien zusammen; diese suchen sich anzuziehen und der Magnet wird infolgedessen, wie in Fig. II, III, IV zu sehen ist, in die Spule hineingezogen. In der Lage IV stößt das — Ende den Nordpol ebenso ab, wie das + Ende den Südpol, und infolgedessen bleibt der Magnetstab

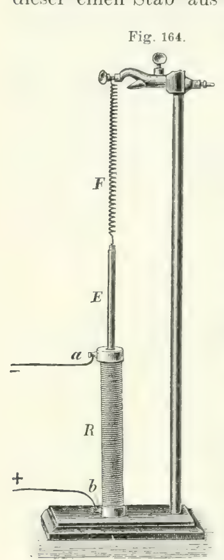
Fig. 163.



in dieser Lage im Gleichgewicht, und wenn er wie in V durch die Spirale teilweise hindurchgezogen worden ist, so wird er aus demselben Grunde von der Spirale wieder zurückgezogen, bis seine Mitte wieder mit der Mitte der Spirale zusammenfällt.

Ist der Stab N S nicht von vornherein ein Magnet, sondern ein Stab aus weichem, unmagnetisiertem Eisen, so wird er infolge der von der Stromspirale ausgehenden Kraftlinien magnetisiert und dann immer in die Spirale hineingezogen. Wenn man also z. B., wie in Fig. 164, eine Rolle R aufstellt, durch die man einen Strom schicken kann, und über dieser einen Stab aus weichem Eisen E an einer Spiralfeder F aufhängt, so wird im Moment des Stromdurchgangs der Eisenkern in die Rolle hineingezogen und bleibt darin, solange der Strom fließt. Sobald der Strom geöffnet wird, also zu fließen aufhört, springt der Eisenstab wieder aus der Rolle heraus. Eine stromdurchflossene Spirale zieht also immer einen Stab aus weichem Eisen in sich hinein. Wir haben von dieser Wirkung schon auf S. 62 Gebrauch gemacht, um ein Meßinstrument für die Stromstärken zu konstruieren. Die Kraft, mit welcher eine solche stromdurchflossene Spule einen Eisenstab in sich hält, ist, wenn der Strom stark genug ist, so groß, daß der Stab frei in einer solchen vertikal gestellten Spule schwebt und der Anziehung der Erde, die ihn zum Herunterfallen bringen würde, nicht folgt.

Fig. 164.

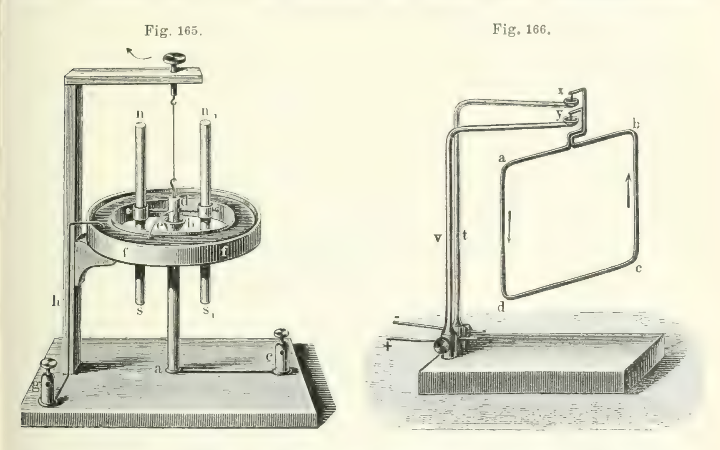


Man kann aber auch durch eine geschickte Kombination von Magneten und Stromkreisen, wie Faraday gezeigt hat, es dahin bringen, daß ein Magnet dauernd um einen elektrischen Strom herumrotiert, wodurch die besondere Art dieser elektromagnetischen Kräfte deutlich hervortritt. Diese Anordnung sieht man in Fig. 165. Es sind die beiden Magnetstäbe n s und n_1 s_1, welche rotieren. Der galvanische Strom wird durch die Klemme c eingeführt und steigt in dem Metallstab a b auf. Ein aufgehängtes Metallstück d, an welchem die Magnete befestigt sind, taucht in das Schälchen mit Quecksilber, welches das Ende von b bildet. Dieses Metallstück d trägt den Draht e, welcher in die mit Quecksilber gefüllte Rinne f f taucht. Es fließt also der Strom von c durch a b in das drehbare Metallstück d und von diesem durch den Draht e in das Quecksilber bei f, von wo aus er durch den Draht h zur Klemme g und von da zum Element zurückgeführt wird. Der Stromteil d e f ist also mit den Magnetstäben beweglich, und es fängt nun, sowie der Strom fließt, das Magnetpaar an, sich zu drehen, und dreht sich so lange, bis der Strom unterbrochen wird. Die Achse der Magnete steht eben hier vertikal und muß vermöge der Anordnung vertikal bleiben, die Kraftlinien aber, die senkrecht durch die Fläche des Stromkreises a b e h g hindurchgehen, sind horizontal, also kann der Magnet nie mit seiner

Achse parallel den Kraftlinien kommen und muß infolgedessen fortwährend rotieren.

Man kann sich sofort auch durch Anwendung der Ampèreschen Schwimmerregel überzeugen, daß die Magnete sich drehen müssen, und auch einsehen, nach welcher Richtung die Rotation stattfinden muß. Denkt man sich nämlich den positiven Strom z. B. in der Richtung c a b fließend, so steht also der Ampèresche Schwimmer in a b aufrecht, und wenn er den Magneten n s ansieht, so muß dessen Südpol, der näher an dem Stromleiter a b steht als der Nordpol, nach hinten (zur rechten Hand des Schwimmers), wenn er aber n_1 s_1 ansieht, so muß dessen Südpol nach vorn aus der Ebene der Figur abgelenkt werden, die Ablenkung der Südpole muß also bei beiden nach entgegengesetzten

Fig. 165. Fig. 166.



Richtungen gehen. Es greift also an diesem Magnetpaar ein Kräftepaar an, und ein solches Kräftepaar bringt immer eine Rotation hervor.

Wir hatten bisher die Bewegung von Magneten unter dem Einfluß feststehender Ströme betrachtet. Umgekehrt muß aber auch, wenn der Stromleiter beweglich und der Magnet fest ist, der Stromleiter sich bewegen und zwar sich ebenfalls so einstellen, daß die Richtung seiner Kraftlinien, die ja senkrecht zu seiner Ebene stehen, parallel der Achse des Magneten wird. Es ist, um diese Behauptung zu bestätigen, die erste Aufgabe, einen Stromkreis herzustellen, der frei beweglich ist, oder von dem wenigstens einzelne Teile frei beweglich sind. Dies wurde von Ampère erreicht durch das nach ihm benannte Ampèresche Gestell. Ampère ließ nämlich den Drahtkreis, dessen Bewegung untersucht werden sollte, mit Spitzen in Näpfchen tauchen, die mit Quecksilber gefüllt waren. Die Näpfchen waren auf leitenden Trägern befestigt. Die Fig. 166 gibt eine Ansicht eines solchen Ampèreschen Gestells.

Der Strom geht in die beiden metallischen Träger v und t, welche an ihrem oberen Ende Quecksilbernäpfe x und y tragen. In diese wird nun der bewegliche Stromkreis a b c d vermittels Spitzen eingetaucht und kann sich also um diese Spitzen beliebig drehen, wenn er unter dem Einfluß von Kräften steht. Man kann entweder das Stromviereck a b c d in Fig. 166 in das Gestell hängen oder den runden Stromkreis in Fig. 167, oder die Spirale Fig. 168, welche dann ein drehbares Solenoid ist. Sowie man dann einen Magneten in die Nähe eines solchen drehbaren Stromkreises bringt, stellt sich der Stromkreis in eine bestimmte Lage gegen den Magneten, und zwar immer so, daß die Ebene des Stromkreises senkrecht steht gegen die Achse des Magnets, daß also die Achsen des Magnets und des Solenoids in einer Linie liegen.

Es wird also ein solcher drehbarer Stromkreis durch die Wirkung eines Magnets ganz ebenso gerichtet, wie eine Magnetnadel. Folglich, das

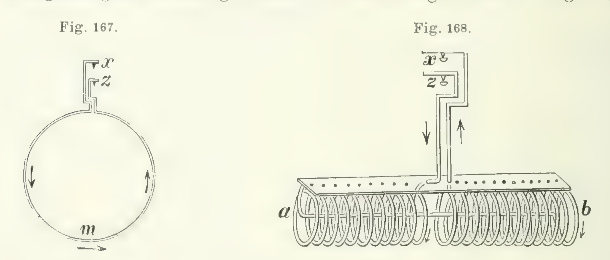


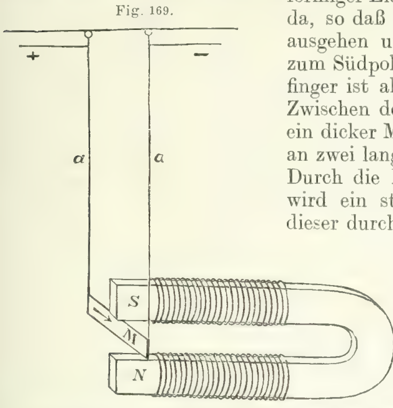
Fig. 167. Fig. 168.

kann man sofort schließen, muß auch der Erdmagnetismus auf einen solchen Stromkreis einwirken, ganz ebenso wie er auf eine Magnetnadel einwirkt. Ebenso wie eine Magnetnadel sich von Süden nach Norden stellt, in die Richtung des magnetischen Meridians der Erde, ebenso muß sich auch ein drehbarer Stromkreis unter dem Einfluß des Erdmagnetismus mit seiner Achse in die Süd-Nordrichtung stellen. Und dies ist in der Tat der Fall. Ein solcher Stromkreis nimmt, wenn er drehbar aufgehängt ist, von selbst eine ganz bestimmte Stellung ein. Er stellt sich nämlich so, daß seine Achse von Süden nach Norden zeigt, daß also seine Ebene senkrecht steht auf dem magnetischen Meridian.

Um die Richtung der Bewegung einzelner Stromteile in einem magnetischen Feld sofort unzweifelhaft zu bestimmen, hat man eine Regel aufgestellt, bei welcher man die drei Finger der linken Hand, den Daumen, den Zeigefinger und den Mittelfinger zu Hilfe nimmt, durch welche man ja drei aufeinander senkrechte Richtungen markieren kann. Diese Regel nennt man die Linke-Hand-Regel. Wenn man den Zeigefinger der linken Hand in die Richtung der magnetischen Kraftlinien des Feldes bringt, den Mittelfinger in die Richtung des Stromes in dem beweglichen Drahtstück, so gibt die Richtung des Daumens immer die Richtung an, nach der das Drahtstück sich bewegt.

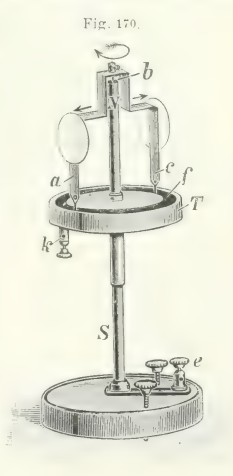
Ein sehr übersichtlicher Fall der Bewegung eines Drahtstückes in einem magnetischen Felde ist durch Fig. 169 gegeben. Ein hufeisenförmiger Elektromagnet N S liegt horizontal da, so daß die Kraftlinien vom Nordpol N ausgehen und durch die Luft nach oben zum Südpol hin sich strecken. Der Zeigefinger ist also dabei nach oben zu halten. Zwischen den Schenkeln des Magneten ist ein dicker Metallstreifen M angebracht, der an zwei langen weichen Drähten a a hängt. Durch die Drähte und den Metallstreifen wird ein starker Strom gesendet. Fließt dieser durch den Metallstreifen von hinten in der Figur nach vorn, so ist der Mittelfinger in diese Richtung zu halten, folglich muß der Streifen in der Richtung des Daumens, also nach links aus dem Magnetfelde herausgetrieben werden. In der Tat sieht man, sobald man den Elektromagneten erregt, den Streifen M aus dem magnetischen Felde herausfliegen. Wird der Magnetisierungsstrom kommutiert, so bewegt sich M gegen die Biegung des Magneten hin, wird auch der Strom in M kommutiert, so bewegt sich M wieder nach links, wie man immer aus der Linken-Hand-Regel sofort erkennt.

Fig. 169.



Ein anderer Versuch, dessen Verlauf auch durch die Linke-Hand-Regel sofort zu bestimmen ist, bildet die Umkehrung des oben (S. 180 f.) angeführten Faradayschen Rotationsversuches. Man kann nämlich auch eine Anordnung von Magneten und Stromleitern so treffen, daß ein stromdurchflossener Draht in kontinuierliche Rotation um einen Magneten herum kommt. Es ist dazu nur nötig, daß ein Teil des Stromkreises beweglich ist, während ein anderer Teil fest ist. Dazu dient eine Einrichtung, wie sie in Fig. 170 gezeichnet ist. In dieser ist ein Teil eines Stromkreises a b c durch die Spitze b beweglich in eine mit Quecksilber ausgefüllte Vertiefung gestellt, welche an dem Ende N des Magnetstabs S N angebracht ist. Die Enden des Stromkreises tauchen in die mit Quecksilber gefüllte Rinne f. Ein Strom einer Batterie wird durch die Klemme e in den Magnetstab geleitet, durchfließt diesen, geht dann von b in die beiden Zweige des Leiters b a und b c, dann in die Quecksilberrinne, und wird durch die Klemme k zur Batterie zurückgeleitet. Der Drahtbügel rotiert dann

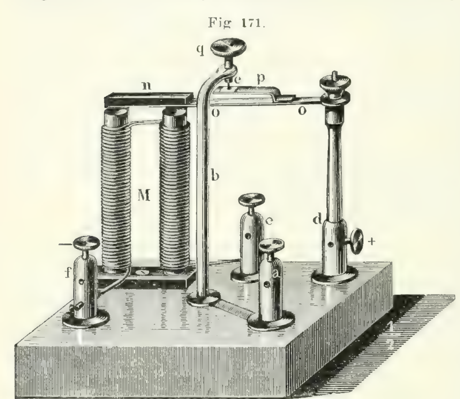
Fig. 170.



dauernd in der Richtung des oben gezeichneten Pfeiles um den Magneten herum.

Wir können leicht die Richtung der Rotation durch die Linke-Hand-Regel finden. Vom Nordpol N des Magneten gehen die Kraftlinien nach oben, also haben wir den Zeigefinger nach oben zu halten. Wenn der Strom im Draht b c, wie gezeichnet, von b zur Quecksilberrinne fließt, so haben wir den Mittelfinger oben auf der rechten Seite des Bügels nach der Richtung des gezeichneten Pfeiles hin zu halten, folglich geht der Daumen nach vorn. Der rechte Teil des Bügels bewegt sich also nach vorn. Auf der linken Seite geht der Strom von b nach a, der Mittelfinger ist in diese Richtung zu halten; der Daumen geht dann nach hinten, also bewegt sich die linke Hälfte des Drahtbügels nach hinten, d. h. der ganze Drahtbügel bewegt sich dabei im Sinne des Uhrzeigers, von oben gesehen. Wird die Richtung des Stromes oder die der magnetischen Kraftlinien umgekehrt, so wird jedesmal auch die Richtung der Rotation umgekehrt.

Fig. 171.



Die elektromagnetischen Wirkungen aller Art haben nun sehr weitgehende Anwendungen gefunden, sowohl in technischer als in wissenschaftlicher Hinsicht. Hier sei zunächst eine auch für wissenschaftliche Zwecke wichtige Anwendung erwähnt. Die Magnetisierung nämlich von weichem Eisen durch einen herumgeleiteten Strom kann man dazu benutzen, um eine rasch schwingende, hin und her gehende Bewegung zu erzeugen. Diese Anordnung hat ein Frankfurter Arzt Neef getroffen und sie wird nach ihm Neefscher Hammer genannt. Die Wirksamkeit dieses Apparats beruht darauf, daß ein Strom um ein Stück weichen Eisens herumgeführt wird, dieses also, wenn er fließt, magnetisch macht. Der Magnet zieht dann einen Anker an; dadurch aber wird vermittels einer passenden Vorrichtung der Strom unterbrochen und infolgedessen der Anker von dem Magneten wieder losgelassen, wodurch der Strom wieder geschlossen wird, und der Vorgang von neuem beginnt. Die Einrichtung eines solchen Hammers ist in Fig. 171 gezeichnet. Die Pole eines Elementes werden mit den Klemmen a und f verbunden, während zwischen d und e ein beliebiger Apparat oder Draht eingeschaltet wird. Dann geht der Strom durch die Metallsäule b zu der Platinspitze c, welche auf die Feder p drückt, so daß der Strom durch diese Feder zu o und d kommt und von dort durch den eingeschalteten Apparat nach e gelangt. Von e aus geht er durch die Windungen des Elektromagnets M nach f und von dort zum Element zurück. Wenn der Strom um den Elektromagneten fließt, wird

dieser magnetisch und zieht den Anker n an. Dieser ist mit der Feder o und p verbunden, so daß zu gleicher Zeit die Feder p von der Platinspitze c weggezogen wird. Dadurch ist nun aber der Strom unterbrochen, folglich auch der Elektromagnet nicht mehr magnetisch. Infolgedessen wird n durch die Feder wieder in die Höhe geschnellt und die Verbindung mit c wieder hergestellt und nun beginnt das Spiel von neuem. Es wird also durch diesen Apparat eine schwingende Bewegung der Feder o p und dadurch auch von selbst eine fortwährende Schließung und Unterbrechung des hindurch geschickten Stromes bewirkt. Die Geschwindigkeit, mit der die Feder schwingt, mit der also auch der Strom unterbrochen und geschlossen wird, hängt von der Länge und der Elastizität der Feder ab. Eine direkte Anwendung wird von dem Neefschen Hammer bei den elektrischen Klingeln gemacht. Man braucht offenbar nur an dem hin und her schwingenden Anker einen Klöppel zu befestigen, der auf eine Glocke schlagen kann, und die elektrische Klingel ist fertig. In der Tat zeigt Fig. 172 eine derartige einfache Klingel (Viktoriawecker von Mix u. Genest in Berlin). Man sieht den Elektromagneten E E mit seinem Anker A, der mit dem Klöppelstiel K aus einem Stück verfertigt ist. An dem Anker sieht man die federnde Platte, die Unterbrecherfeder, die sich an die Kontaktspitze S anlegen oder von ihr trennen kann. Der Strom wird von einem Element durch die beiden Klemmen m und n der Klingel zugeführt, geht von m zum Elektromagneten, von diesem zur Kontaktspitze und durch die Unterbrecherfeder nach n. Dadurch kommt der Anker, wie erklärt, in schwingende Bewegung, der Klöppel schlägt an die Glocke. Ist die Leitung vom Element nach den Klemmen des Weckers unterbrochen, so funktioniert die Klingel natürlich nicht. Um die Leitung vom Element zur Klingel beliebig, etwa von einem Zimmer aus, zu schließen oder zu unterbrechen, werden bekanntlich Kontaktknöpfe benutzt, deren äußere Ansicht in Fig. 173, deren Einrichtung durch Fig. 174 dargestellt ist. Der eine Draht, der vom Element in das Zimmer führt, ist mit der Feder f verbunden, und von der anderen Feder f¹ führt die Leitung weiter zur Klingel. Die beiden Federn f und f¹ sind für gewöhnlich getrennt, die Leitung vom Element zur Klingel ist also unterbrochen. Durch einen Druck auf den Elfenbeinknopf c wird aber f an f¹ angedrückt,

Fig. 172.

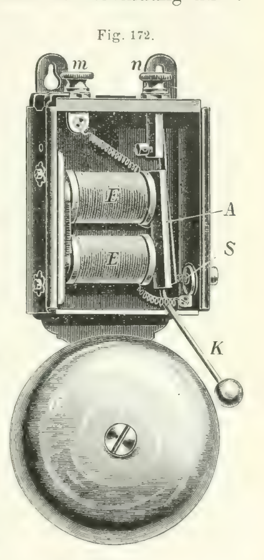


Fig. 173.

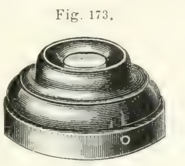
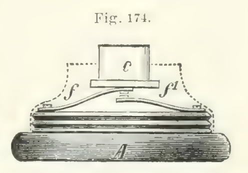


Fig. 174.

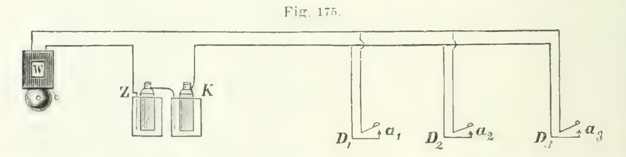


der Strom geht durch f und f¹ vom Element zur Klingel und diese funktioniert.

Um von einer beliebigen Anzahl von Zimmern aus die Glocke ertönen lassen zu können, muß in jedem derselben ein solcher Kontaktknopf vorhanden sein, und zwar werden diese Kontakte alle parallel geschaltet. Es wird nämlich, wie Fig. 175 zeigt, von der Batterie Z K der eine Pol Z mit der Klingel W verbunden und von der anderen Klemme der Klingel sowohl, wie von dem anderen Pol K der Batterie führen zwei getrennte Drähte bei sämtlichen Zimmern des Hauses vorbei, von denen aus geschellt werden soll. In jedem Zimmer, z. B. in D_1, werden zwei Drähte von dieser Leitung abgezweigt, von jedem Draht einer, welche zu dem Druckknopf D_1 mit seinem beweglichen Kontakt a_1 geführt werden. Dasselbe geschieht im Zimmer D_2 und im Zimmer D_3 u. s. f. Wird also z. B. in D_3 der Knopf gedrückt, so geht der Strom von Z durch W, a_3, D_3 nach K, Element und Klingel sind also miteinander verbunden und die Glocke tönt.

Eine höchst bedeutende praktische Anwendung der elektromagnetischen Erscheinungen bilden die elektrischen Motoren, Elektromotoren, bei welchen Ströme unter dem Einfluß von Magneten oder

Fig. 175.



Magnete unter dem Einfluß von Strömen rotieren und in den Stand gesetzt werden, ihre Rotation auf andere Maschinen zu übertragen und dadurch Arbeit zu leisten. Diese technisch wichtigen Anwendungen werden wir aber erst im zweiten Teil dieses Werkes behandeln.

In wissenschaftlicher Hinsicht aber haben die elektromagnetischen Wirkungen ihre ausgedehnteste Anwendung gefunden bei der Konstruktion von Galvanometern. Da nämlich die elektromagnetischen Kräfte immer um so stärker sind, je größer die Stromstärke ist, so kann man aus den Wirkungen dieser Kräfte direkt auf die Stromstärke schließen. Dabei wird die Konstruktion dieser Galvanometer eine verschiedene, je nachdem sie dazu dienen sollen, starke oder mittlere oder ganz schwache Ströme zu messen. Als starke Ströme werden dabei solche anzusehen sein, welche nach Ampere rechnen, also mindestens 1 Ampere betragen, sonst aber beliebig stark sein können. Als mittelstarke Ströme können wir solche rechnen, die herabgehen bis zu ein Zehntausendstel Ampere ($^1/_{10}$ Milliampere). Die ganz schwachen Ströme liegen also unterhalb dieser Grenze und man kann sie noch bis zu der Stärke von etwa dem hunderttausendmillionsten Teil eines Ampere (10^{-11} Ampere) messen.

Sehr bequem und leicht ist jetzt die Messung von starken und mittelstarken Strömen. Das sind Ströme, wie sie bei den meisten Meßmethoden und bei den technischen Anwendungen vorkommen und gerade deshalb hat die Technik die Meßinstrumente für sie in eine möglichst einfache

und praktische Form gebracht. Zugleich werden diese Apparate mit solcher Genauigkeit konstruiert, daß man auch für wissenschaftliche Zwecke sie jetzt allgemein anwendet.

Hauptsächlich sind für alle Galvanometer zwei magnetische Wirkungen des elektrischen Stromes in Benutzung. Die eine Konstruktion besteht darin, daß man den Strom durch eine fest aufgestellte Drahtrolle sendet und durch ihn eine drehbare Magnetnadel aus ihrer natürlichen Nord-Südrichtung ablenken läßt. Die Größe dieser Ablenkung ist ein Maß für die untersuchte Stromstärke. Man bezeichnet Galvanometer dieser Art als Nadelgalvanometer. Die zweite Methode besteht darin, daß man den zu untersuchenden Strom selbst durch eine feine drehbare Drahtrolle gehen läßt, die unter der Wirkung eines starken, fest aufgestellten Magneten steht und sich in dem Feld desselben dreht. Galvanometer dieser Art nennt man Drehspulengalvanometer oder auch Deprezgalvanometer, weil von Deprez zuerst diese Form angegeben wurde.

Ein wesentlicher Unterschied zwischen diesen beiden Arten von Galvanometern ist sofort ersichtlich. Bei den Nadelgalvanometern steht die bewegliche Magnetnadel erstens unter dem Einfluß des zu untersuchenden Stromes und zweitens unter dem Einfluß der magnetischen Kraft der Erde. Diese letztere aber ist zunächst in ihrer Größe gewissen Schwankungen unterworfen. Ferner aber wird die Lage der Nadel beeinflußt von allen magnetischen Körpern in der Nähe, also von allen ruhenden oder bewegten Eisenmassen, da diese immer magnetisch sind. Ferner aber noch von allen magnetischen Wirkungen, die von starken in der Nähe befindlichen Strömen ausgehen. Und solche Ströme sind jetzt in großen Städten fast überall vorhanden, da die Leitungen für elektrisches Licht und für elektrische Trambahnen solche Ströme führen. Bei den elektrischen Trambahnen kommt noch ein besonders störender Umstand dazu. Bei diesen fließt zwar ein Strom durch die über den Schienen gespannte Oberleitung, also in fester Bahn, er fließt aber zurück durch die Schienen und verbreitet sich von diesen aus in wechselnden Bahnen durch den mehr oder minder feuchten Boden. Solche Erdströme beeinflussen ebenfalls die Nadeln von Nadelgalvanometern.

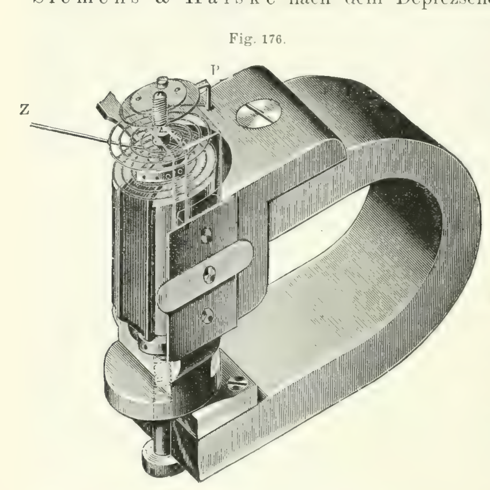
Im Gegensatz dazu ist in den Drehspulengalvanometern ein von einem starken Magneten gebildetes magnetisches Feld vorhanden, welches so stark ist, daß die Wirkungen der Erde oder von Eisenmassen oder von starken in der Nähe vorbeifließenden Strömen gar nicht dagegen in Betracht kommt.

Wenn daher die Drehspulengalvanometer ebenso empfindlich gemacht werden könnten wie die Nadelgalvanometer und keine sonstigen Nachteile diesen gegenüber hätten, so wären sie durchaus den ersteren vorzuziehen. Das ist aber doch nicht immer der Fall und deswegen sind beide Arten von Galvanometern noch im Gebrauch, obwohl die Drehspulengalvanometer in den meisten Fällen die Nadelgalvanometer aus dem Felde geschlagen haben. Für starke und mittelstarke Ströme werden hauptsächlich Drehspulengalvanometer zu Meßzwecken konstruiert, insbesondere, weil man diese so einrichten kann, daß man ohne lange Rechnung die Stromstärke direkt ablesen kann. Denn da bei ihnen die Ausschläge der Spule

unabhängig von äußeren Einflüssen und die Drehungen der beweglichen Rolle nahe proportional der Stromstärke sind, so kann man solche Galvanometer mit einer Skala versehen, die man direkt in Ampere teilen kann. Man nennt solche Apparate, welche direkt ohne Rechnung die Stromstärke in Ampere abzulesen gestatten, Amperemeter. Man kann aber weiter jedes Galvanometer, indem man es in den Nebenschluß legt (S. 100), dazu benutzen, um die Spannung an seinen Enden zu bestimmen. Ist bei solchen Instrumenten, die man im Nebenschluß anwendet, die Skala gleich in Volt geteilt, so nennt man sie Voltmeter.

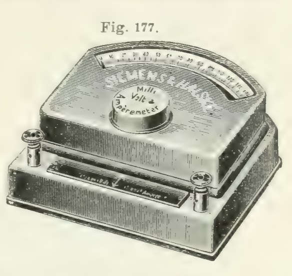
Solche Präzisions-Volt- und Amperemeter werden von Siemens & Halske nach dem Deprezschen Prinzip in folgender Form ausgeführt: Ein flacher, kräftiger Magnetstab ist so umgebogen, daß seine beiden Pole einander gegenüberstehen. Fig. 176 zeigt die eine (rechte) Hälfte eines solchen Magnetstabs, die linke Hälfte, die ebenso gebildet ist, ist fortgelassen. Die beiden Pole des Magneten sind mit massiven Polschuhen P versehen (von denen wieder bloß der rechte sichtbar ist), die halbzylindrisch ausgeschnitten sind, so daß sie zwischen sich einen zylinderförmigen Raum zur Aufnahme der beweglichen Spule freilassen. In diesem Raum steht aber zunächst ein eiserner Hohlzylinder, der nur einen Zwischenraum von 2 mm Breite zwischen sich und den Wandungen der Polschuhe läßt. Da der Hohlzylinder magnetisch induziert wird, so entsteht in dem ringförmigen Zwischenraum ein sehr starkes magnetisches Feld. In diesem kann sich nun die bewegliche Spule drehen. Diese ist aus dünnem Draht, auf einen leichten Kupferrahmen gewickelt, der Rahmen selbst hat eine Achse, die oben und unten auf Edelsteinen gelagert ist. Die Achse trägt einen langen Zeiger Z, der auf einer Skala spielt. Die Achse ist nun durch zwei flache Spiralfedern oben an dem Gehäuse befestigt, so daß, wenn sie sich dreht, die Federn aufgewunden werden, und zwar so lange, bis ihre Torsionskraft der Kraft, mit der die Spule gedreht wird, das Gleichgewicht hält. Die Federn dienen zugleich zur Zuführung des Stromes in die Spule. Geht also ein Strom durch die Spule, so sucht die Spule sich so einzustellen, daß die Ebene ihrer Windungen senkrecht zu den Kraftlinien steht (s. S. 181). Die Torsion der Spiralen stemmt sich dieser Bewegung entgegen, und so kommt die

Fig. 176.



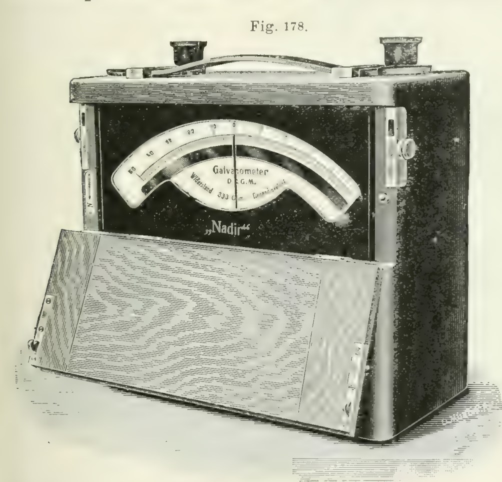
Spule je nach ihrer Stromstärke in bestimmter Lage zur Ruhe. Die Anordnung des magnetischen Feldes und der Spule bewirkt, daß die Ausschläge des Zeigers direkt den angewendeten Stromstärken proportional sind. Diese Instrumente, deren äußere Ansicht Fig. 177 zeigt, werden gewöhnlich so eingerichtet, daß jeder Grad der Skala einem Milliampere (bei Instrumenten von größerem Widerstand auch einem Zehntel Milliampere) entspricht. Das Instrument läßt also als Amperemeter direkt Stromstärken von 0,001 bis 0,15 Ampere messen. Indem man Nebenschlüsse von geringem Widerstand, etwa bis zu $^1/_{19999}$ Ohm, parallel zum Instrument schaltet, kann man (nach S. 103) den Meßbereich bis auf 3000 Ampere erhöhen. Manchmal werden diese Nebenschlüsse gleich direkt zwischen den Klemmen des Instrumentes fest angebracht und dann wird die Teilung des Instrumentes gleich in Ampere ausgeführt.

Fig. 177.



Um die Skala eines solchen Instrumentes richtig herzustellen, oder um sie später zu kontrollieren, muß man einen Strom durch den Apparat gehen lassen, dessen Stärke man zugleich mit einem Voltameter (S. 138) oder in der Praxis gewöhnlich mit einem Kompensationsapparat (S. 106) bestimmt.

Fig. 178.



Dieselben Instrumente messen, im Nebenschluß zu einem Stromkreis geschaltet, die Spannungsdifferenz an zwei Punkten in Volt, wobei man, um den Meßbereich zu erweitern, noch Vorschaltwiderstände vor das Instrument schaltet (S. 101). Ist die Skala dann gleich in Volt geeicht, so heißen die Apparate Voltmeter.

Die Messung von starken und mittelstarken Stromstärken ist durch diese Apparate eine sehr bequeme. Die kleinste Stromstärke, die man bisher auf diese Weise durch Zeigerausschläge messen konnte, betrug $^1/_{10}$ Milliampere. Indes sind einige Fabriken in der letzten Zeit darüber

weit hinausgegangen, insbesondere die Weston Instrument Company in Berlin und die „Nadir“ Meßinstrumentenfabrik in Berlin-Rixdorf. Diese stellen auch für sehr schwache Ströme Zeigergalvanometer her. Die Fig. 178 zeigt ein solches hochempfindliches Nadirgalvanometer in seiner äußeren Form als tragbares Instrument. Jeder Grad des Zeigerausschlags entspricht einer Stromstärke von 3/10 000 Milliampere ($3 \cdot 10^{-7}$ Ampere). Dabei hat das Instrument, das ein Galvanometer Deprezscher Form ist, einen Widerstand von 333 Ohm. Das ist bisher das äußerste, was mit Zeigerinstrumenten, bei denen der bewegliche Teil in Spitzen gelagert ist, erreicht wurde.

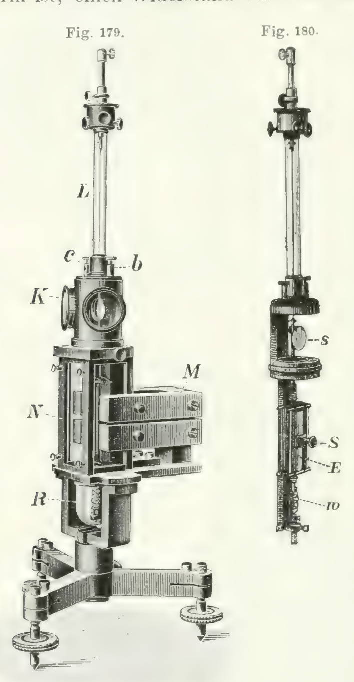


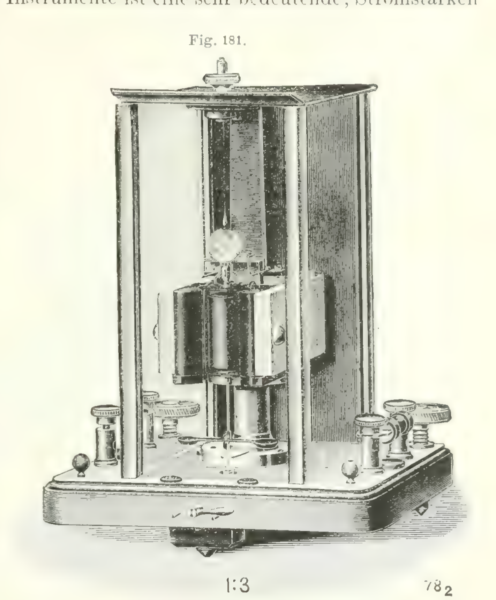
Fig. 179. Fig. 180.

Für noch größere Empfindlichkeiten, also um noch geringere Stromstärken zu messen, muß man den beweglichen Teil der Instrumente an einem Faden aufhängen, und an dem beweglichen Teil einen Spiegel befestigen. Die so konstruierten Galvanometer nennt man Spiegelgalvanometer. Man befestigt bei den Nadelgalvanometern an der beweglichen Nadel und bei den Drehspulengalvanometern an der beweglichen Spule einen Spiegel und mißt die Drehungen der Nadel oder Spule, indem man eine entfernte Skala sich in dem Spiegel spiegeln läßt. Jeder kleinen Drehung des Spiegels entspricht dann eine gewisse Ablenkung des Skalenbildes, das man durch ein Fernrohr beobachtet. Die Skala befindet sich dicht unter dem Fernrohr in ungefähr derselben Höhe wie der Spiegel, und zwar in beliebigem Abstand von ihm, gewöhnlich zwischen 1 und 3 m. Die kleinsten Ablenkungen des aufgehängten Systems zeigen sich dann schon durch große Ablenkung der Teilstriche der Skala im Spiegel an.

Bei den Deprezschen Spiegelgalvanometern besteht wieder der bewegliche Teil aus einer Drahtrolle, welche an einem Metallfaden in dem magnetischen Feld eines starken Stahlmagneten aufgehängt ist, und welcher nun der zu messende Strom zugeführt wird. Bei dem Deprez-Galvanometer von Edelmann (Fig. 179) sieht man zwei zusammengeschraubte starke Magnete M, einen Hufeisenmagneten darstellend. Zwischen den Polen desselben befindet sich die bewegliche

Drahtrolle, die durch einen feinen Metalldraht (ein dünnes Metallband) in der Röhre L oben aufgehängt ist und die unten in eine metallische Spiralfeder R ausgeht. Durch den Metalldraht und die Spiralfeder wird der Strom zu- und abgeleitet (bei b und c). Bei K befindet sich der Spiegel. Die Drahtrolle S ist, wie man in der Fig. 180 sieht, die den herausnehmbaren Teil des Instrumentes zeigt, auf einen rechteckigen Rahmen gewunden. Sie besteht aus vollständig eisenfreiem Kupferdraht, und in ihrem Innern befindet sich noch ein fester Eisenzylinder E, um die magnetischen Kraftlinien möglichst auf die Rolle zu konzentrieren. Die Empfindlichkeit dieser Instrumente ist eine sehr bedeutende; Stromstärken bis zu dem zehnmillionsten Teil eines Milliampere lassen sich mit ihnen messen. Der ganze mittlere Teil des Instruments ist durch einen Glaskasten geschützt. Auf die Güte des Magnetstahls und die Eisenfreiheit der Kupferdrähte ist bei diesen Galvanometern die größte Sorgfalt zu verwenden.

Fig. 181.



Solche Deprez-Galvanometer werden von verschiedenen Fabriken nach demselben Prinzip, aber in äußerlich sehr verschiedenen Formen ausgeführt. Sie haben auch die große Annehmlichkeit, daß sie sich mit Anwendung einfacher Vorsichtsmaßregeln sehr bequem transportieren lassen. Daher eignen sie sich auch besonders gut zu Vorlesungsgalvanometern. Ein gerade für solche Zwecke sehr bequem konstruiertes Spiegelgalvanometer ist das in Fig. 181 dargestellte, das von Hartmann & Braun in Frankfurt a. M. konstruiert ist. In einem seitlich und vorn mit Glaswänden versehenen Gehäuse hängt die Drehspule mit Spiegel an einem feinen Metalldraht zwischen den Polen eines liegenden Hufeisenmagneten. In ihrem Innern ist ein fester zylindrischer Eisenkern angeordnet. Die drehbare Spule selbst ist mit zwei getrennten Windungen versehen, eine aus feinem Draht von etwa 100 Ohm Widerstand, die andere aus stärkerem Draht mit 5 Ohm Widerstand, wodurch das Instrument verschiedene Empfindlichkeiten besitzt. Der Strom wird durch den Aufhängedraht den Spulen zugeführt, und durch feine Silberbändchen, die die Spulen mit den

festen Klemmen verbinden, abgeführt. Das Instrument erlaubt Ströme von 4 Millionstel Milliampere ($4 . 10^{-9}$ Ampere) zu messen.

Bei den Deprez-Spiegelgalvanometern, die von Siemens & Halske konstruiert sind, und die in Fig. 182 abgebildet sind, ist die Einrichtung getroffen, daß die bewegliche Spule mit ihrem Aufhängeband u. s. w. als ein besonderes Einsatzsystem ausgebildet ist, das in den Untersatz, welcher die Hufeisenmagnete enthält, einfach eingesetzt wird. Fig. 183 zeigt den Untersatz mit den stehenden Stahlmagneten, Fig. 184 das Einsatzsystem, bestehend aus der Drahtrolle mit innerem Eisenkern, Aufhängeröhre und Spiegel.

Bei den Drehspulengalvanometern bewegt sich die stromführende Drahtrolle in dem engen Hohlraum zwischen den Magnetpolen und dem in-

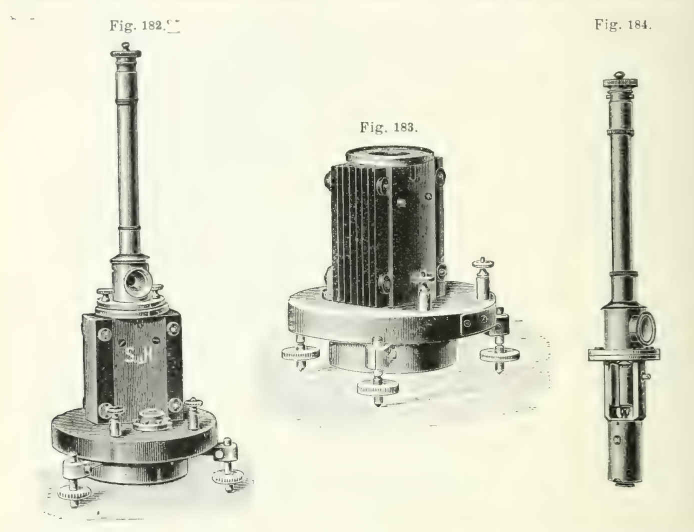


Fig. 182. Fig. 183. Fig. 184.

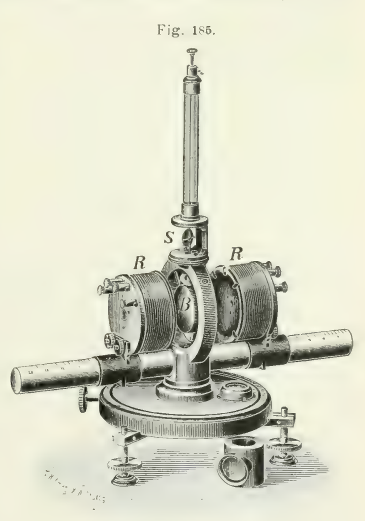
neren Eisenkern. Infolgedessen wird ihre Bewegung, wie wir im 9. Kapitel erkennen werden, durch entstehende Induktionsströme stark gedämpft, d. h. das bewegliche System, das durch einen Strom aus seiner normalen Ruhelage abgelenkt wird, bewegt sich nicht in mehr oder minder raschen Schwingungen, sondern ganz langsam in seine neue Gleichgewichtslage. Diese langsame Bewegung ist unter Umständen ein großer Nachteil dieser Instrumente. Je stärker das magnetische Feld ist, um so größer ist die Dämpfung, um so langsamer kommt die bewegliche Spule, oft erst nach vielen Minuten, in ihre Ruhelage. Wenn man also die Empfindlichkeit des Instrumentes sehr groß machen will, indem man das Feld möglichst stark macht, so hat man zugleich eine höchst unbequem langsame Einstellung. Aus diesem Grunde kann man die allerhöchsten Empfindlichkeiten mit diesen Instrumenten nicht erreichen.

Man kommt immer noch weiter in der Empfindlichkeit mit denjenigen Galvanometern, bei welchen eine aufgehängte Magnetnadel von dem zu messenden Strom abgelenkt wird, den sogenannten Nadelgalvanometern. Diese Instrumente waren früher allein gebräuchlich, sind aber für die meisten Fälle in größeren Städten aus den oben angegebenen Gründen durch die Drehspulengalvanometer verdrängt worden. In Orten ohne elektrische Trambahnen oder an Stellen, die entfernt von diesen sind, werden sie aber noch jetzt vorteilhaft benutzt und wenn man die allergrößten Empfindlichkeiten erzielen will, so sind es Nadelgalvanometer in besonderer Ausführungsform, welche dieses ermöglichen.

Um mit Nadelgalvanometern schwache Ströme messen zu können, muß man den Strom in vielen Windungen sehr eng um die Nadel herumführen, wodurch, da jede Windung eine drehende Kraft auf die Nadel ausübt, die Gesamtwirkung vergrößert wird. Man nennt solche Apparate auch Multiplikatoren.

Man hat gewöhnlich für jedes Galvanometer verschiedene Rollenpaare, um größere oder geringere Widerstände und mehr oder weniger Umwindungen zur Verfügung zu haben, und es wird häufig die Einrichtung so getroffen, daß die Rollen in verschiedenen Entfernungen von der Magnetnadel festgestellt werden können. Die Magnetnadel hat gewöhnlich nicht die Form einer Nadel, sondern die eines Ringes oder eines aufgeschlitzten Hufeisens, die man dann Ringmagnete oder Glockenmagnete nennt.

Fig. 185.



Die Ansicht eines solchen Galvanometers mit verschiebbaren Rollen, eines Wiedemannschen Spiegelgalvanometers neuerer Form von Hartmann & Braun, gibt Fig. 185. In der Glasröhre hängt ein Kokonfaden, der oben befestigt ist und an den unten ein Spiegelchen S angehängt ist, das man in der Figur frei sieht. An dem Spiegel hängt dann weiter unten ein kleiner ringförmiger Magnet, der in der Figur nicht sichtbar ist, sondern der sich in der Höhlung einer kupfernen Büchse B befindet. Zu beiden Seiten dieser Kupferbüchse befinden sich, auf einem Metallrohr mit Teilung verschiebbar, zwei Drahtrollen R R, die dicht an die Kupferbüchse herangeschoben oder auch von ihr entfernt gehalten werden können. Das kleine, rechts unten besonders abgebildete Gehäuse mit Glasfenster wird über den Spiegel geschoben, um Luftströmungen zu verhindern. Man beobachtet die Drehungen des Spiegels durch das Fenster vermittels Fernrohr und Skala.

Sehr lästig ist bei derartigen Messungen das langsame Schwingen des Magneten um seine jeweilige Gleichgewichtslage herum. Man bringt infolgedessen Vorrichtungen an, um die Schwingungen zu d ä m p f e n, d. h. um zu bewirken, daß der Magnet sofort ohne viele Schwingungen in seine neue Lage übergeht. Dies wird gewöhnlich, wie gerade bei dem eben beschriebenen Instrument, dadurch erreicht, daß man den Magneten in einer ihn sehr eng umschließenden Hülle aus Kupfer, einem sogenannten K u p f e r d ä m p f e r , schwingen läßt. Es entstehen dann, wie wir im 9. Kapitel sehen werden, Induktionsströme, welche die Bewegung des Magneten sehr rasch dämpfen. Bei geeigneter Form des Magneten ist die Dämpfung eine so rapide, daß der Magnet fast gar keine Schwingungen macht, sondern sich direkt in seine Gleichgewichtslage einstellt. Man nennt Galvanometer dieser Art a p e r i o d i s c h e G a l v a n o m e t e r.

Von der größten Bedeutung für die Empfindlichkeit eines Galvanometers ist es, den Einfluß des Erdmagnetismus auf die Nadel möglichst abzuschwächen. Denn in der Tat, wenn der Erdmagnetismus gar nicht wirkte, so würde ja schon der schwächste Strom die Magnetnadel senkrecht zu der Ebene stellen, die er umfließt, also einen Ausschlag von 90^0 hervorbringen. Je mehr also die Wirkung des Erdmagnetismus aufgehoben wird, desto größere Ausschläge erhält man schon bei kleinen Stromstärken, desto schwächere Ströme kann man also messen. Man kann nun die Wirkung des Erdmagnetismus auf doppelte Weise schwächen oder aufheben. Zunächst nämlich dadurch, daß man oberhalb der Nadel einen Magnetstab verschiebbar anbringt. Gibt man diesem Stab diejenige Richtung, daß sein Nordpol nach Norden zeigt, so schwächt er die Einwirkung des Erdmagnetismus. Denn die Erde läßt sich bekanntlich als ein Magnet auffassen, dessen Südpol im Norden liegt (weswegen eben Magnetnadeln mit dem Nordpol nach Norden zeigen). Ein solcher Magnetstab, den man den A s t a s i e r u n g s m a g n e t e n nennt, kann dem Galvanometermagnete beliebig genähert werden und so die Einwirkung des Erdmagnetismus mehr oder minder schwächen, so daß man dadurch fast jeden beliebigen Grad der A s t a s i e hervorbringen kann.

Je stärker die Astasierung eines Galvanometers ist, desto geringer ist also die Kraft, welche die Galvanometernadel in die Gleichgewichtslage (die Nordsüdrichtung) zurückzuziehen sucht. Wird daher die Nadel durch den Strom abgelenkt, so werden die Schwingungen, die sie um die Gleichgewichtslage herum ausführt, immer langsamer, je stärker astasiert das Galvanometer ist, eben weil die Kräfte, die die Nadel beeinflussen, geringere sind. Mit der Erhöhung der Astasie ist also bei jedem Galvanometer eine Vergrößerung der Schwingungsdauer verbunden, so daß man sogar umgekehrt aus der Angabe der Schwingungsdauer der Magnetnadel auf den Grad der Astasierung bei einem und demselben Instrument schließen kann. So sagt man, ein Galvanometer sei astasiert bis auf 6 Sekunden oder 20 Sekunden Schwingungsdauer.

Ein zweites Mittel, um die Einwirkung des Erdmagnetismus möglichst zu verringern, besteht darin, daß man in dem Galvanometer nicht e i n e n Magneten (Nadel-, Ring-, Glockenmagneten), sondern zwei e n t g e g e n g e s e t z t l i e g e n d e Magnete fest miteinander ver-

bunden drehbar aufhängt. Ein solches Magnetpaar nennt man ein astatisches Nadelpaar und ein Galvanometer, das ein solches enthält, ein astatisches Galvanometer. Solche wurden zuerst von Sir W. Thomson konstruiert und heißen deshalb Thomson-Galvanometer. Da man aber zwei solche Magnete nicht ganz genau gleich machen kann, so benutzt man außerdem immer noch einen außerhalb angebrachten Astasierungsmagneten. Indem man bei diesen Instrumenten die Magnetsysteme nicht an Kokonfäden, sondern an Quarzfäden aufhängt, erzielt man eine außerordentlich große Empfindlichkeit. In der Tat sind die Thomson-Galvanometer die empfindlichsten Instrumente, die man bisher in dieser Art konstruiert hat. Man kann mit ihnen noch Ströme messen, die bloß den hunderttausendmillionsten Teil eines Ampere (10^{-11} Ampere) an Stärke besitzen.

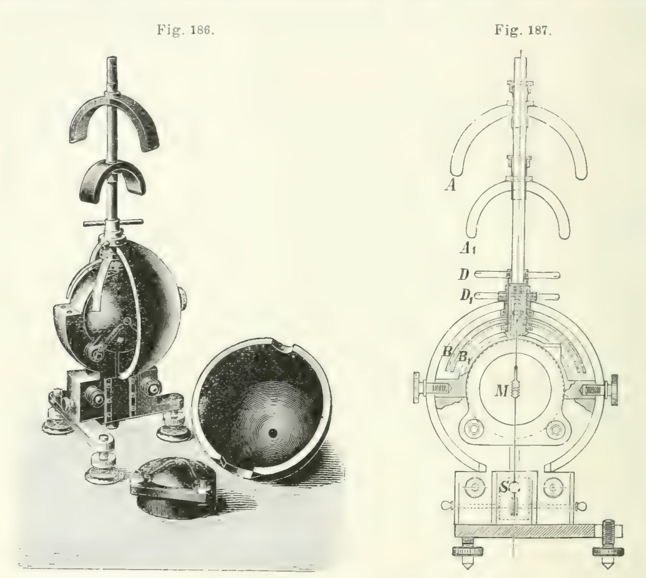
Diese feinen Instrumente wurden aber mit dem Fortschreiten der Anwendung der Elektrizität in den Städten allmählich unbrauchbar, oder wenigstens war ihre hohe Empfindlichkeit nicht mehr auszunutzen. Die Astasierung nämlich, durch welche die Nadeln dem Einfluß des Erdmagnetismus entzogen sind, bewirkt ja andererseits, daß die Nadeln keine sichere Ruhelage mehr haben, daß sie durch alle oben erwähnten äußeren Störungen, z. B. durch bewegte Eisenmassen, ferner durch Ströme, die in der Erde fließen oder in benachbarten Drähten zirkulieren, daß sie durch alle diese beeinflußt werden, daß daher die Nadel solcher Galvanometer mit ihrem Spiegel in fortwährender unregelmäßiger Bewegung ist, so daß Messungen nur in Ausnahmsmomenten möglich sind. Selbstverständlich gibt es immer noch Orte genug, an denen man diese Instrumente benutzen könnte, aber gerade da, wo sie sonst hauptsächlich angewendet wurden, sind sie heute fast nicht mehr brauchbar.

Um nun aber doch diese sehr bequemen Instrumente höchster Empfindlichkeit anzuwenden, hat man noch ein Mittel, welches darin besteht, nicht nur das magnetische Feld der Erde, sondern auch andere störende Felder, wie sie aus den erwähnten Ursachen vorkommen, in dem Instrument möglichst klein zu machen. Dies Mittel besteht darin, daß man das Instrument in das Innere eines Eisenkörpers bringt. Eine einzige solche Eisenhülle genügt allerdings nicht, um das äußere Feld möglichst abzuschwächen, man verwendet vielmehr 2 oder 3 solche Eisenhüllen, die durch Luft voneinander getrennt sind. Man bezeichnet dieses Hilfsmittel als Panzerung des Galvanometers. Ein solches Kugelpanzergalvanometer von Rubens & Dubois wird von Siemens & Halske hergestellt, und dieses ist ein hoch empfindliches und gegen die gewöhnlichen äußeren Störungen fast vollständig geschütztes Nadelgalvanometer. Eine Ansicht desselben gibt Fig. 186. Im Innern einer Kugel aus Stahlguß befindet sich das eigentliche Galvanometer. Dasselbe enthält, wie der Durchschnitt in Fig. 187 zeigt, ein ganz feines Magnetsystem M, das sich in dem Hohlraum zwischen zwei enganliegenden Spulen befindet. Die Spulen sind selbst in Stahlgußhüllen (die auch abgenommen werden können) eingeschlossen, und diese stahlgepanzerten Spulen bilden den inneren Panzer des Instrumentes. Der Spiegel S hängt sehr tief und ist unten durch eine Öffnung sichtbar. Die inneren Astasierungsmagnete $B\,B_1$ werden durch die Griffe $D\,D_1$ gedreht. Das ganze Galvano-

meter wird noch in ein Stahlgefäß gebracht, so daß es einen dreifachen Panzer besitzt. Außer den Astasierungsmagneten B B_1 im Innern sind auch außerhalb des Kugelpanzers und des dritten Panzers noch gebogene Magnetstäbe A A_1 angebracht, welche gedreht werden können und zur vollständigen Astasierung des Systems dienen.

Benutzt man bei allen diesen Galvanometern nur kleine Ablenkungen des beweglichen Teils, die man durch Fernrohr und Skala beobachtet, so kann man dadurch Stromstärken messen, zunächst in willkürlichem Maß, nämlich durch die Anzahl der Skalenteile, die durch die Drehung des Spiegels im Fernrohr durchgewandert sind. Aber man kann die Strom-

Fig. 186. Fig. 187.

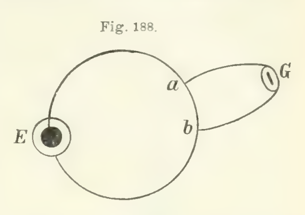


stärke auch sofort in Ampere angeben, wenn man den sogenannten Reduktionsfaktor des Instrumentes kennt. Man bestimmt den Reduktionsfaktor eines Galvanometers dadurch, daß man einen Strom, dessen Stärke in Ampere man kennt (etwa durch ein Voltameter), durch das Galvanometer schickt und den Ausschlag beobachtet.

Will man starke Ströme mit Spiegelgalvanometern messen, so darf man dieselben natürlich nicht direkt durch die Galvanometer gehen lassen, weil die Drähte dieser Galvanometer eben nur für sehr schwache Ströme bestimmt sind und durch starke Ströme verbrennen würden. Man hilft sich dann dadurch, daß man in das Galvanometer nur einen ganz kleinen bekannten Bruchteil des ganzen Stromes schickt. Dies geschieht dadurch, daß man das Galvanometer in eine Zweigleitung bringt, wie Fig. 188 es zeigt. Man sagt dann, das Galvanometer liegt im Neben-

schluß. Von E aus geht der Strom, dessen Stärke man messen will. An den Punkten a und b liegt das Galvanometer im Nebenschluß an, das nun die Stärke in seinem Zweige a G b direkt angibt. Kennt man nun noch den Widerstand des Galvanometers und den Widerstand von a b, so ist die Stromstärke in a b nach unseren Sätzen auf S. 71 um so viel größer als die in G, als der Widerstand von a b kleiner ist als der von G. Die Stromstärke im Hauptstrom ist dann die Summe der Stromstärken in G und in a b. Gewöhnlich gibt man jetzt den Rollen oder Spulen der Galvanometer einen Widerstand, der sich in Dekaden ausdrückt, also von 1 Ohm, 10 Ohm, 100 oder 1000 Ohm, und ebenso nimmt man als Widerstand a b, zu dem man das Galvanometer parallel schaltet, einen einfachen dekadischen Widerstand, also 1 Ohm oder 0,1 oder 0,01 Ohm u. s. w.

Fig. 188.



Man kann aber jedes Galvanometer noch zu einem anderen sehr wichtigen Zweck benutzen. Bei einem dauernden Strom, der durch den Draht des Galvanometers fließt, geht in jedem Moment eine bestimmte Elektrizitätsmenge durch den Draht. Die Stromstärke ist ja gleich der pro Sekunde durch jeden Querschnitt fließenden Elektrizitätsmenge, und ein solch dauernd fließender Strom bringt eine dauernde Ablenkung der Magnetnadel oder der Spule im Galvanometer hervor. Wenn man aber nur eine bestimmte Elektrizitätsmenge, z. B. diejenige, die sich auf der einen Belegung einer geladenen Leydener Flasche befindet, durch den Draht des Galvanometers fließen läßt, so erhält man nicht einen dauernden Strom, sondern einen momentanen Strom. Durch einen solchen bekommt die Nadel des Galvanometers gewissermaßen einen Stoß, so daß sie aus ihrer Ruhelage sich herausbewegt. Aber da der Stoß sofort aufhört, so bleibt die Nadel nicht abgelenkt, sondern kehrt sofort wieder in ihre Ruhelage zurück, die sie nach einigen Schwingungen erreicht.

Der momentane Strom bewirkt, daß die Nadel von ihrer Ruhelage aus einen Ausschlag macht, der aber nicht anhält. Je größer die Elektrizitätsmenge ist, die momentan durch den Draht fließt, um so größer ist dieser erste Ausschlag. Man sieht, daß wenn man den ersten Ausschlag, den die Nadel dabei macht, beobachtet, daß man daraus ein Maß für die ganze Elektrizitätsmenge hat, die durch den Draht geflossen ist.

Ein Galvanometer, das für diesen Zweck gebraucht wird, bezeichnet man als ballistisches Galvanometer. Jedes gewöhnliche Galvanometer eignet sich dazu. Damit aber der erste Ausschlag bei gegebener Elektrizitätsmenge möglichst groß sei, muß das Instrument eine große Schwingungsdauer haben, d. h. der bewegliche Teil muß langsam schwingen, damit er sich noch in der Ruhelage befindet während der ganzen Zeit, in welcher die Elektrizitätsmenge sich durch den Draht bewegt. Ferner ist die Dämpfung des Galvanometers möglichst klein zu halten, damit der Ausschlag ein großer wird. Bei Nadelgalvanometern nimmt man daher gewöhnlich den Kupferdämpfer heraus, wenn man es ballistisch verwerten will. Bei den Spulengalvanometern vergrößert man

die Schwingungsdauer der beweglichen Spule, wenn man die Instrumente zu ballistischen Messungen anwenden will, künstlich dadurch, daß man zu der Spule noch ein Zusatzgewicht gibt. So enthält z. B. das Galvanometer von Hartmann & Braun, das in Fig. 181 abgebildet ist, an dem unteren Stift, der an der Spule befestigt ist, zwei kleine Teller, in welche die Kugeln eingelegt werden können, die in dem Fußbrett des Instruments zu sehen sind. Durch diese Beschwerung des beweglichen Teils wird die Schwingungsdauer des Instruments vergrößert.

Um die Elektrizitätsmenge, die durch den ersten Ausschlag gemessen wird, in Coulomb auszudrücken, muß man wieder den Reduktionsfaktor für diese ersten Ausschläge bestimmen, d. h. man muß bestimmen, wie groß der erste Ausschlag ist, den eine bekannte Anzahl Coulomb hervorbringt. Wie das zu machen ist, wird aus dem folgenden hervorgehen.

Mit einem so geeichten ballistischen Galvanometer ist es dann möglich, die Zahl der Coulomb zu bestimmen, welche bei einem sehr kurz dauernden Strom durch den Galvanometerdraht hindurchgegangen sind. Diese Methode hat eine große Anwendbarkeit für viele Zwecke. Zunächst aber interessiert es uns hier, daß es auf diese Weise möglich ist, die Kapazität eines Kondensators zu messen.

Haben wir nämlich einen Kondensator und verbinden wir die eine Belegung mit dem positiven Pol einer Batterie, die andere mit der Erde, zu welcher wir auch den anderen Batteriepol ableiten, so muß von der Batterie so viel Elektrizität auf die Platte überströmen, bis die Spannung der geladenen Belegung gleich der Spannung des mit ihr verbundenen Batteriepols ist und die Menge der auf dieser Platte liegenden Elektrizität ist dann (S. 14)

$$\text{Elektrizitätsmenge} = \text{Kapazität} \times \text{Spannung}.$$

Die Spannung kennt man aber; diese ist gleich der elektromotorischen Kraft der angewendeten Batterie. Die Elektrizitätsmenge kann man aber eben ballistisch in Coulomb messen, und so kann man daraus die Kapazität berechnen. Um die Elektrizitätsmenge zu messen, die auf dem Kondensator enthalten ist, verbindet man nach der Ladung die geladene Platte des Kondensators mit dem einen Pol des ballistischen Galvanometers, dessen anderer Pol ebenfalls zur Erde abgeleitet ist. Die Elektrizitätsmenge geht durch den Draht des Galvanometers zur Erde und der erste Ausschlag der Nadel oder Spule gibt die Zahl der Coulomb an, die von der positiven Platte zur Erde übergeströmt sind. Die Spannung der Batterie wird durch ein Voltmeter gemessen, und so findet man aus diesen beiden Beobachtungen

$$\text{Kapazität in Farad} = \frac{\text{Anzahl der Coulomb}}{\text{Spannung in Volt}}.$$

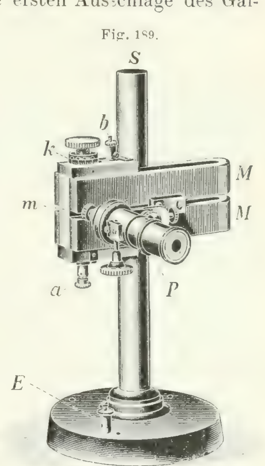
Auf diese Weise hat man in dem Galvanometer auch ein Mittel, um Kapazitäten zu messen.

Wenn man umgekehrt einen Kondensator von schon bekannter Kapazität hat (z. B. 1 Mikrofarad, oben S. 19) und diesen z. B. in städtischen Zentralen mit der Lichtleitung von 110 Volt ladet, so liegt auf ihm die bekannte Elektrizitätsmenge 110 Mikrocoulomb. Läßt man diese bekannte Elektrizitätsmenge durch das Galvanometer zur Erde gehen,

so erhält man einen bestimmten Ausschlag und hat damit das ballistische Galvanometer geeicht, seinen Reduktionsfaktor bestimmt, da man dadurch weiß, wie groß der erste Ausschlag für 1 Mikrocoulomb oder 1 Coulomb ist.

Mit dem ballistischen Galvanometer kann man nun auch, wie man leicht einsieht, die Dielektrizitätskonstante einer Substanz (S. 27) messen. Wenn man zwischen zwei Kondensatorplatten einmal Luft als Zwischenmedium hat, das andere Mal die zu untersuchende Substanz, z. B. Glas, so ist die Kapazität des Kondensators im zweiten Fall größer als im ersten, und das Verhältnis der beiden Kapazitäten ist gerade gleich der gesuchten Dielektrizitätskonstante. Wenn man also diesen Kondensator beidemal von derselben Batterie aus ladet und durch dasselbe Galvanometer entladet, so verhalten sich die ersten Ausschläge des Galvanometers in beiden Fällen wie die beiden Kapazitäten des Kondensators. Das Verhältnis der beiden ersten Ausschläge ist also gleich der Dielektrizitätskonstanten des Zwischenmediums (Glas) bezogen auf Luft als Einheit.

Fig. 189.



Wie oben angeführt, kann man jedes Nadel- oder Spulengalvanometer als ballistisches Galvanometer benutzen. Eine besonders hohe Empfindlichkeit aber für ballistische Zwecke, d. h. zur Messung von Elektrizitätsmengen, haben Galvanometer einer neuen, seit einigen Jahren eingeführten Form, die sogenannten Saitengalvanometer. Bei diesen hängt ein sehr feiner Platin- oder Silberfaden oder auch ein versilberter Quarzfaden, mehr oder weniger gespannt, zwischen den Polen eines Magneten und durch diesen Draht selbst wird ein konstanter oder momentaner Strom gesendet. Dann macht der Faden nach der Linken-Hand-Regel eine Ausbiegung, die senkrecht zu den Kraftlinien des Magneten und senkrecht zu seiner eigenen Richtung, der Richtung des Stromes steht. Diese Ausbiegung wird gemessen und zwar gewöhnlich durch ein Mikroskop. Fig. 189 zeigt ein solches Saitengalvanometer von Edelmann in München, bei dem zwei Hufeisenmagnete M M zwischen ihren Polen die durch a und k gespannte Saite enthalten, deren Ausbiegungen durch das Mikroskop P beobachtet werden. Die Empfindlichkeit dieses Instruments ist um so größer, je feiner die ausgespannte Saite ist.

8. Kapitel.

Die Kraftwirkungen elektrischer Ströme aufeinander. (Elektrodynamik.)

Die elektromagnetischen Erscheinungen, die wir in dem vorhergehenden Kapitel behandelt haben, ließen sich alle in kurzer Weise so zusammenfassen, daß galvanische Ströme, Stromkreise, sich genau ebenso verhielten wie Magnete. Ein Solenoid (eine von einem Strom durchflossene Drahtspirale), wenn es beweglich aufgehängt war, stellte sich in den magnetischen Meridian wie ein Magnet, es wurde von einem Magneten angezogen und abgestoßen wie ein Magnet, es hatte seinen Nord- und Südpol wie ein Magnet, es übte auf einen Magneten Anziehungs- und Abstoßungskräfte aus wie ein Magnet, es machte weiches Eisen magnetisch wie ein Magnet. Der Gedanke liegt nahe, daß nun zwei stromdurchflossene Solenoide, zwei Stromkreise aufeinander ebenso mit anziehenden und abstoßenden Kräften wirken werden wie zwei Magnete. Man hätte dann zwischen zwei Strömen allein, ganz ohne Magnete, anziehende und abstoßende Kräfte. Dieser Gedanke zeigte sich bestätigt. Es war Ampère, welcher diese Einwirkung von galvanischen Strömen aufeinander untersuchte, und welcher durch scharfsinnige Experimente und Überlegungen diese Wirkungen elektrischer Ströme aufeinander vollständig aufklärte. Man nennt die gesamte Lehre von den mechanischen Kräften, die galvanische Ströme aufeinander ausüben, Elektrodynamik.

Um die mechanischen Wirkungen von galvanischen Strömen aufeinander studieren zu können, mußte Ampère die Ströme, wenigstens teilweise, beweglich machen. Es wird also bei diesen Untersuchungen am besten wieder das Ampèresche Gestell angewendet, das schon im vorigen Kapitel beschrieben wurde. Dem beweglichen Stromkreis muß man dann einen festen nähern, um die Anziehungen oder Abstoßungen bestimmen zu können. Wenn man in Fig. 190 durch das Ampèresche Gestell (links in der Figur) einen Strom in der durch die Pfeile angegebenen Richtung hindurchsendet und diesem beweglichen Stromkreis den festen Stromkreis g f (rechts) nähert, so tritt folgendes ein:

Fließt der positive Strom in g f von unten nach oben, also in gleicher Richtung wie in c b, so wird c b von g f angezogen. Fließt der Strom in f g von oben nach unten, also in entgegengesetzter Richtung wie in c b, so wird c b abgestoßen. Ganz ebenso verhält sich die Seite a d des beweglichen Stromkreises. Fließt der Strom in f g in gleicher Richtung wie in a d, so wird a d angezogen, c b abgestoßen; fließt der Strom in f g in entgegengesetzter Richtung wie in a d, so wird a d abgestoßen, c b angezogen. Es ergibt sich daraus der Satz: Zwei parallele gleichgerichtete Ströme ziehen einander an, zwei parallele

in entgegengesetzter Richtung fließende Ströme stoßen einander ab.

Da ein beweglicher Drahtkreis, wie der in Fig. 190 gezeichnete, schon von selbst unter dem Einfluß des Erdmagnetismus eine gewisse bestimmte Stellung einnimmt, wie wir S. 182 gesehen haben, indem seine Ebene sich senkrecht zum magnetischen Meridian stellt, so tritt diese Anziehung und Abstoßung zweier paralleler Ströme hierbei nicht ganz rein auf. Um daher von der Einwirkung des Erdmagnetismus, welche bei diesen Untersuchungen nur störend wirken kann, frei zu sein, hat Ampère einen sogenannten astatischen Stromkreis konstruiert, welcher in Fig. 191 abgebildet ist. In diesem fließt nämlich in den beiden äußeren Drähten der Strom nach einer und derselben Richtung, ebenso in den beiden mittleren Drähten. Denken wir uns jede Drahthälfte durch einen kleinen Magneten ersetzt, der senkrecht durch die Ebene des Drahtes hindurchgesteckt ist, so ist der nach vorn zum Beschauer hin gerichtete Pol dieses Magneten für den Stromkreis b c d a ein Nordpol, für den Stromkreis c d e f ein Südpol. Die beiden Hälften zusammen verhalten sich also wie ein astatisches Magnetpaar, und daher hebt sich auch die Wirkung des Erdmagnetismus auf den ganzen Stromkreis auf, und dieser stellt sich nicht senkrecht zu dem magnetischen Meridian. Nähert man nun diesem astatischen Leiter jetzt einen festen Stromkreis, so kann man deutlich sehen, daß parallele gleichgerichtete Ströme sich anziehen, entgegengesetzt gerichtete Ströme sich abstoßen. Als festen Stromkreis nimmt man zweckmäßig nicht bloß einen einfachen Draht, wie in Fig. 190, sondern einen ganzen Rahmen mit vielen nebeneinander und aufeinander liegenden Drähten, in denen allen der Strom in derselben Richtung fließt. Eine solche Anordnung zeigt Fig. 192. Auf dem Stativ G steht beweglich der astatische Stromkreis, M N ist der mit Draht umwundene Rahmen. Ströme von 3 bis 4 Ampere Stärke werden durch die Klemmschrauben in die Drähte geleitet und können durch die Kommutatoren R und S kommutiert werden. In der Figur sind die Ströme in m n und M N gleich gerichtet. Diese ziehen sich also an und stellen sich einander parallel.

Fig. 190.

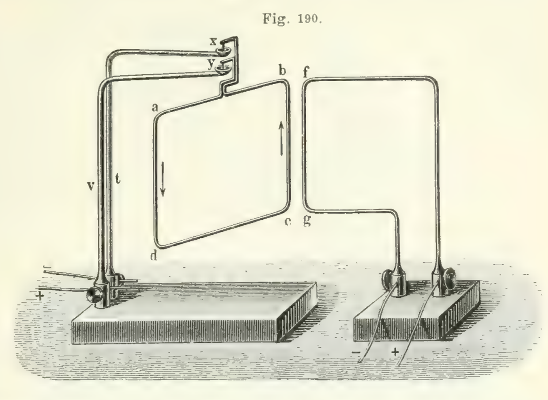
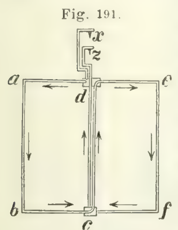


Fig. 191.



Nach der Untersuchung von parallelen Stromteilen ging Ampère über zu der Untersuchung von gekreuzten Stromteilen, indem er etwa den festen Leiter 1 2 3 4 in Fig. 193 schräg gegen die Unterseite des beweglichen Leiters x k t z stellte. Das Gesetz, das Ampère für diese gekreuzten Ströme gefunden hat, lautet nun: Zwei gekreuzte Ströme suchen sich in jedem Fall so zu stellen, daß sie parallel werden und der Strom in ihnen nach derselben Richtung fließt. Man kann diese Wirkung zweier gekreuzter Ströme sehr gut an dem in Fig. 194 gezeichneten Apparat sehen. In demselben ist ein fester Rahmen A B mit einer Reihe von Drahtwindungen versehen, in welche ein Strom durch die Klemmschrauben f und g eingeführt wird. Innerhalb des festen Rahmens befindet sich ein beweglicher leichter Rahmen C D, der auch mit einer Lage von Drahtwindungen versehen ist. Auch in diese Drähte kann durch eine, in der Figur nicht gezeichnete Vorrichtung mittels Quecksilbernäpfchen ein Strom eingeführt werden. In der Figur sind die beiden Drahtkreise gekreuzt gezeichnet. Sie streben also danach, sich parallel und gleichgerichtet zu stellen, und in der Tat fängt der innere Rahmen sich unter der Einwirkung der Ströme an zu drehen, bis die Drahtwindungen einander parallel stehen und die Ströme in ihnen gleichgerichtet sind.

Fig. 192.

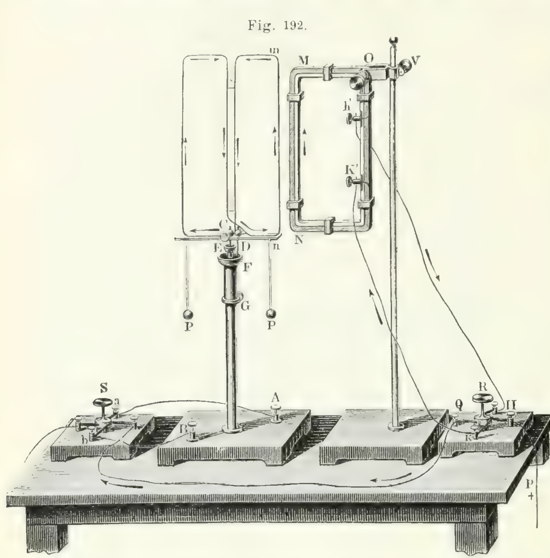
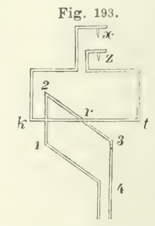


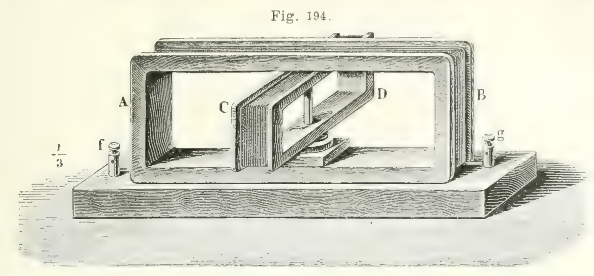
Fig. 193.



Diese beiden qualitativen Gesetze der Wirkung paralleler und gekreuzter Ströme lassen sich in dem einen Satz zusammenfassen, daß zwei Ströme sich, welche Stellung sie auch zueinander haben, immer parallel und gleichgerichtet zu stellen suchen. Denkt man sich durch jede Stromebene ihre magnetischen Kraftlinien gezogen, so heißt dies auch, daß die Kraftlinien zweier Stromkreise sich parallel und nach derselben Richtung einzustellen suchen.

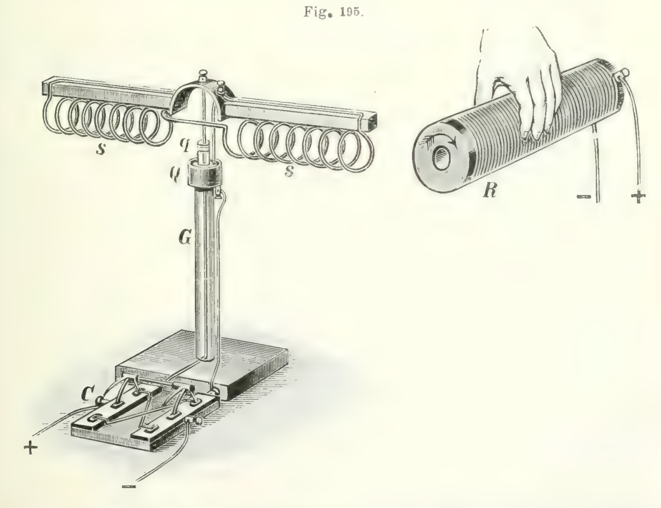
Am deutlichsten kommen diese Wirkungen, auch bei verhältnismäßig schwachen Strömen, wieder zur Beobachtung, wenn man statt einfacher Drahtkreise vielmehr, wie in Fig. 195, zwei Drahtspulen, Solenoide,

Fig. 194.



nimmt, von denen eines s s drehbar auf einem Ampèreschen Gestell G sitzt (mittels der Quecksilbernäpfe Q und q). In beide Solenoide wird der Strom durch Kommutatoren gesendet, wie es bei dem einen durch den Kommutator C gezeichnet ist. Das feste Solenoid R zieht, wenn man es in die Nähe bringt, das eine Ende des drehbaren an und stößt das andere Ende ab, und zwar zieht es dasjenige Ende an, in dem der Strom

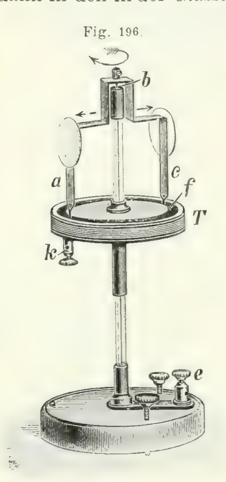
Fig. 195.



parallel zu seinem eigenen genäherten Ende fließt. Durch Umkehren des Stromes in dem einen oder in dem anderen Solenoid geht immer die Anziehung in Abstoßung über und umgekehrt. Die beiden Solenoide verhalten sich genau wie zwei Magnetstäbe.

Genau so wie Faraday eine Anordnung getroffen hat, bei der ein beweglicher Strom unter der Wirkung eines Magnetes in dauernde Rotation kommt (oben S. 183 Fig. 170), genau so kann man nun auch ein bewegliches Stromstück durch einen anderen Strom zu dauernder Rotation bringen. Ein solcher elektrodynamischer Rotationsapparat ist in Fig. 196 gezeichnet. Auch hier ist es ein leichter Aluminiumbügel a b c, welcher rotiert, indem er mit einer Spitze b in ein Quecksilbergefäß eintaucht, während seine Enden in die Quecksilberrinne f tauchen. Statt eines Magnets ist aber hier ein Strom vorhanden, welcher in einer Anzahl kreisförmiger Windungen bei T um die Quecksilberrinne fließt. Der Strom wird durch die Klemme e eingeleitet, geht dann in den in der Glassäule des Apparates verlaufenden Draht und damit in den beweglichen Bügel und in die Quecksilberrinne f, von dort in die Drahtwindungen T, und wird bei k wieder herausgeleitet. Sobald der Strom fließt, muß der Bügel a b c sich zu drehen anfangen, und zwar bei den in der Figur gezeichneten Stromrichtungen entgegengesetzt der Richtung, in welcher der positive Strom durch den Kreisdraht fließt. Entspricht nämlich die obere Seite des Kreisstromes einem Nordpol, so fließt der Strom um T von oben gesehen im umgekehrten Uhrzeigersinn. Nach der Linken-Hand-Regel ist dann der Zeigefinger nach oben, der Mittelfinger ist in dem Draht b c nach links zu halten, folglich geht der Daumen nach vorn und gibt also eine Drehung des Bügels im Uhrzeigersinn.

Fig. 196.

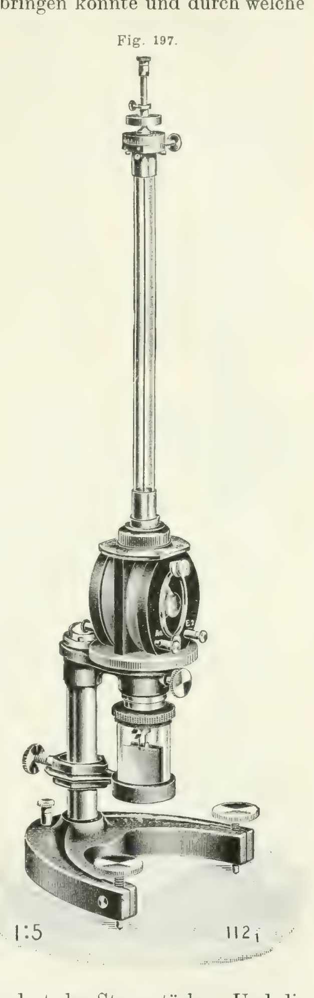


Was nun die Größe der Kräfte betrifft, die zwei Stromkreise aufeinander ausüben, so hängt diese einerseits davon ab, welche Lage und Entfernung die beiden Stromkreise gegeneinander haben, und andererseits hängt sie ab von der Stärke der Ströme, die durch die beiden Stromkreise fließen. Je stärker jeder der beiden Ströme ist, desto größer ist auch die Kraft, mit welcher die Stromkreise aufeinander wirken. Die (elektrodynamische) Kraft zwischen zwei Stromkreisen hängt immer ab von dem Produkt der Stromstärken in ihnen, sie ist unter sonst gleichen Umständen um so größer, je größer dieses Produkt ist. Werden beide Stromkreise von demselben Strom durchflossen, so ist daher die auftretende elektrodynamische Kraft abhängig von dem Quadrat der Stromstärke, d. h. sie ändert sich nicht der Größe und Richtung nach, wenn man dem Strom die entgegengesetzte Richtung gibt. Deswegen rotiert auch bei dem Apparat Fig. 196 der bewegliche Bügel immer in demselben Sinne weiter, auch wenn man die Stromrichtung in dem Apparat durch einen Kommutator umkehrt.

Durch eine große Reihe sehr sorgfältiger Experimente hat Wilhelm Weber die elektrodynamische Kraft genau zahlenmäßig untersucht. Es diente ihm zu dieser Untersuchung eine feste und eine beweg-

liche Drahtrolle, welche er in verschiedene Lagen gegeneinander und in verschiedene Entfernungen voneinander bringen konnte und durch welche er Ströme verschiedener Stärke senden konnte. Es zeigte sich dabei, daß die Kraft, mit welcher die bewegliche Drahtrolle von der festen angegriffen wurde, unter sonst gleichen Umständen (gleicher Lage und gleicher Form) direkt abhängt und nur abhängt von dem Produkt der Stromstärken, die in den beiden Rollen herrschen. Weber konstruierte daher umgekehrt einen Apparat, das Elektrodynamometer, bestehend aus einem festen und einem beweglichen Stromkreise, in welchem man direkt durch die Ablenkung des beweglichen Stromkreises auf die Größe des Produktes der Stromstärken schließen konnte, welche in beiden Stromkreisen herrschen. Eine einfache Anordnung dieses Apparates war schon in Fig. 194 gezeichnet. Sendet man also einen und denselben Strom durch beide Drahtrollen hintereinander, so ist die Kraft, mit welcher die bewegliche Rolle gedreht wird, proportional dem Quadrat der Stromstärke. Wirkt dieser Kraft eine andere, z. B. die Torsionskraft eines Aufhängedrahtes, entgegen, so kommt die bewegliche Rolle in einer bestimmten Lage ins Gleichgewicht, in welcher sie um einen bestimmten Winkel von ihrer Anfangslage abgelenkt ist. Es gibt daher der Winkel, um welchen sich die innere Rolle C D dreht, ein Maß für das Quadrat der Stärke des Stromes, welcher beide Rollen durchfließt. Wird der Strom in beiden Rollen zugleich kommutiert, so ändert sich daher weder die Richtung noch die Größe der Ablenkung.

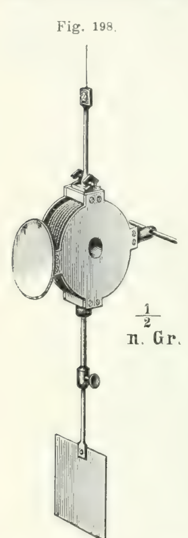
Fig. 197.



Ein solches Elektrodynamometer läßt sich also als Apparat zur Messung der Stromstärke benutzen. Die Größe der Kraft hängt ja direkt ab von dem Quadrat der Stromstärke. Und die Kraft wird ja leicht durch den Winkel gemessen, um welchen sich die bewegliche Rolle unter ihrem Einfluß dreht. Mit einem Elektrodynamometer kann man aber nun auch, was man mit Voltametern und Galvanometern nicht

kann, die Stärke von Strömen messen, deren Richtung rasch hintereinander wechselt, von Wechselströmen, wie solche von den Induktionsapparaten und den Wechselstrommaschinen geliefert werden. In der Tat bleibt ja die Ablenkung der beweglichen Rolle dieselbe, wenn der Strom in entgegengesetzter Richtung durch das Elektrodynamometer geleitet wird, falls er eben in beiden Rollen zugleich kommutiert wird. Darauf beruht die große Bedeutung, welche die Elektrodynamometer als Meßapparate gewonnen haben. Sie erlauben die Stromstärke nicht bloß bei Gleichströmen (Strömen konstanter Richtung) zu messen, sondern auch die von Wechselströmen (Strömen wechselnder Richtung).

Fig. 198.



$\frac{1}{2}$ n. Gr.

Bei allen Elektrodynamometern verschiedener Form befindet sich eine bewegliche Rolle innerhalb einer festen Rolle. Die Form der Rollen kann verschieden sein. Wir beschreiben hier zunächst nur das Elektrodynamometer für schwache Ströme von F. Kohlrausch, von dem Fig. 197 die Ansicht gibt (ausgeführt von Hartmann & Braun in Frankfurt a. M.). Dasselbe ist, wie alle feinen Instrumente für schwache Ströme, zur Spiegelablesung eingerichtet. Die bewegliche Rolle, die in Fig. 198 besonders gezeichnet ist, besteht aus Drähten, die auf einen Elfenbeinrahmen aufgewunden sind. An dem Rahmen ist ein Spiegel befestigt, den man durch das Fenster des Apparates mittels eines Fernrohres beobachtet. Die bewegliche Rolle hängt an einem Metallfaden, der oben an dem drehbaren Torsionskopf der Glasröhre befestigt ist. Die Achse der beweglichen Rolle trägt unten ein platiniertes Platinblech, welches in ein Gläschen mit Schwefelsäure taucht und dort innerhalb eines ebenfalls platinierten U-förmigen Platinblechs hängt. Das Platinblech dient einerseits dazu, um der beweglichen Rolle den Strom zuzuführen, andererseits aber, um die Schwingungen der Nadel zu dämpfen. Die festen Rollen sind von ovaler Form und umschließen die bewegliche Spule sehr eng. Man kann einen und denselben Strom durch die feste und die bewegliche Rolle senden, oder auch durch jede einen anderen Strom. In der Ruhelage sind die Drahtwindungen der beweglichen Rolle senkrecht zu denen der festen Rolle zu stellen. Wird ein Strom durch beide Rollen gesendet, so sucht sich die bewegliche Rolle parallel der festen zu stellen, dreht sich also und tordiert dabei den Aufhängedraht. Sie bleibt daher in einer Lage in Ruhe, in welcher die elektrodynamische Kraft des Stromes, die dem Quadrat der Stromstärke proportional ist, gerade gleich der Torsionskraft des Aufhängedrahtes ist. Das Instrument ist sehr empfindlich, insbesondere für die schwächsten Wechselströme. Andere Elektrodynamometer und andere Anwendungen derselben werden wir in Kapitel 10 „Wechselströme" behandeln.

Die vollständige Analogie, welche zwischen Stromkreisen, insbesondere Solenoiden, und Magneten besteht, führte Ampère auf die Idee, daß man sich die Wirkungen eines Magneten erklären könne, wenn man

ihn als ein System von galvanischen Kreisströmen ansähe. Wenn man annimmt, daß um jedes Molekül des Eisens, ob das Eisen nun magnetisch ist oder nicht, ein galvanischer Strom im Kreise herumfließt, so lassen sich alle Wirkungen eines Magneten durch die elektrodynamischen Wirkungen dieser Ströme, die Ampère *Molekularströme* nennt, erklären. In gewöhnlichem, unmagnetischem weichen Eisen liegen alle Moleküle mit ihren Molekularströmen ganz beliebig wirr durcheinander. Wenn dann ein bestimmter Molekularstrom nach außen z. B. anziehend wirkt, so gibt es immer einen anderen, der ebenso stark abstoßend wirkt. Ein Stück Eisen, in welchem also die Molekularströme beliebig durcheinander liegen, kann gar keine elektrodynamische Wirkung ausüben. Wenn man aber um dieses Stück Eisen eine Drahtspirale legt und einen Strom durch diese hindurchsendet, so wirkt dieser Strom auf jeden einzelnen der Molekularströme elektrodynamisch ein. Wir haben gesehen, daß gekreuzte Ströme sich immer parallel zu stellen streben. Wenn also die Moleküle mit ihren Molekularströmen frei beweglich sind, so müssen sich alle einzelnen Molekularströme so stellen, daß sie parallel und gleichgerichtet dem Strom in der Magnetisierungsspirale sind. Wenn daher in Fig. 199 durch die Richtung des äußeren Pfeiles die Richtung des magnetisierenden Stromes gegeben ist, so müssen alle Molekularströme sich so einstellen, wie es die Figur durch die Pfeile in den kleinen Kreisen anzeigt. Wenn aber zwei nebeneinander liegende Molekularströme in gleicher Richtung fließen, dann ist, wie Fig. 200 zeigt, an den Seiten, wo sie zusammentreffen, A B und C D, die Richtung des Stromes in beiden entgegengesetzt. Es heben sich infolgedessen die Wirkungen aller dieser inneren Seiten auf und man kann nun annehmen, daß um jeden Magnet ein Strom herumfließt, der die Summe der äußersten Molekularströme ist. Einen Magnetstab (Fig. 201) kann man also einfach auffassen als einen Stab, welcher von einer großen Reihe von parallelen galvanischen Strömen umflossen ist. Die Pfeile stellen die einzelnen Molekularströme dar, sie haben alle dieselbe Richtung. Wenn man nun den Magnetstab von der Seite S ansieht, so fließen die Ströme um dieses Ende in derjenigen Richtung, welche ein Uhrzeiger bei seiner Umdrehung hat. Betrachtet man dagegen die Ströme von dem mit N bezeichneten Ende, so fließen sie entgegengesetzt, wie der Zeiger der Uhr sich dreht. Obwohl also alle Molekularströme in gleicher Richtung fließen, ist der Sinn der Stromrichtung für den Außenraum bei dem einen Ende ein anderer als bei dem anderen. Das eine Ende wird ein Nordpol, das andere ein Südpol. Da wir bei der Magnetisierung durch einen Strom bereits gesehen haben (S. 163), daß um den Südpol der magnetisierende Strom in der Richtung des Uhrzeigers fließt, so können wir sofort sagen, daß auch die Molekularströme um den Südpol die Richtung des Uhrzeigers haben werden.

Fig. 199.

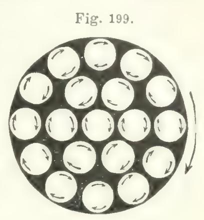
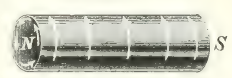


Fig. 200.

A C B D

Fig. 201.



Durch diese Auffassung eines Magneten als eines Systems von parallelen Kreisströmen ist der Magnetismus, der zunächst als eine ganz besondere, von der Elektrizität verschiedene Erscheinung auftritt, zurückgeführt auf eine elektrische Erscheinung. Die Molekularströme aber, die um jedes magnetische Molekül kreisen sollen, kann man sich nach der Elektronentheorie sehr einfach vorstellen. Man braucht bloß anzunehmen, daß um ein solches Molekül ein Elektron herumrotiert, wie der Mond um die Erde. Dann entspricht ein solches kreisendes Elektron einem galvanischen Kreisstrom und auch der Magnetismus der Körper ist dadurch auf bewegte Elektronen zurückgeführt.

Wir hatten bei allen früher betrachteten Wirkungen des elektrischen Stromes, bei den Wärmewirkungen und chemischen Wirkungen eine merkwürdige Reziprozität gefunden. Jede Wirkung, die ein elektrischer Strom hervorrief, war, wenn sie von der Richtung des Stromes abhängt, umgekehrt imstande, selbst wieder einen elektrischen Strom zu erzeugen. Es liegt nahe, zu vermuten, daß auch alle die Wirkungen, welche wir in den beiden letzten Kapiteln besprochen haben, Wirkungen, welche ja wesentlich von der Richtung des Stromes abhängen, umgekehrt selbst imstande sein werden, elektrische Ströme hervorzubringen. Wir sahen, daß ein elektrischer Strom Eisen magnetisch macht; wir können fragen, ob nicht auch umgekehrt Magnetisierung von Eisen einen elektrischen Strom hervorbringt. Wir sahen, daß durch elektrische Ströme Magnete bewegt werden. Wir können fragen, ob nicht auch durch Bewegung von Magneten Ströme erzeugt werden. Beide Fragen werden mit Ja beantwortet werden. Wir sahen, daß durch einen festen galvanischen Strom ein beweglicher bewegt wird, ja sogar in dauernde Rotation kommen kann. Es wird sich umgekehrt zeigen, daß durch die bloße Bewegung eines galvanischen Stromes auch Ströme erzeugt werden können. Kurz, alle die Wirkungen, welche wir jetzt betrachtet haben, gestatten eine Umkehrung, und diese umgekehrten Wirkungen werden Induktionswirkungen genannt.

---

9. Kapitel.

Induktion.

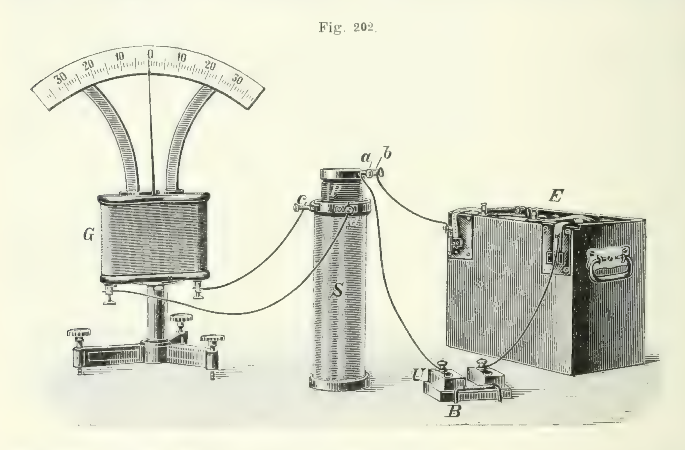
Michael Faraday, dessen Name bei der Entwickelung unserer Kenntnisse von der Elektrizität in allererster Reihe genannt werden muß, Michael Faraday ist es, von dem die so überaus wichtigen und interessanten Erscheinungen der elektrischen Induktion nicht nur entdeckt, sondern auch fast vollständig erforscht wurden. Faraday ging aus von den Erscheinungen der elektrischen Influenz, die lange bekannt waren. Ein jeder elektrisch geladene Körper bringt auf einem anderen in seiner Nähe befindlichen durch Influenz ebenfalls Elektrizität hervor. Die bloße Anwesenheit eines elektrischen Körpers ist imstande, einen vorher unelektrischen Körper elektrisch zu machen. Sollte nicht auch bei elektrischen Strömen etwas Ähnliches stattfinden? Sollte nicht auch durch einen Strom, der in einem Leiter fließt, in einem anderen in der Nähe befindlichen geschlossenen Leiter ein elektrischer Strom erregt werden? Diese Frage stellte sich Faraday und suchte sie durch geschickt ausgedachte und ausgeführte Versuche zu beantworten. Was er fand, entsprach nicht ganz seinen ursprünglichen Vermutungen; die von ihm entdeckten Erscheinungen waren so auffallend und wunderbar, daß er seine Anschauungen oft modifizieren mußte. Aber mit dem größten experimentellen Scharfsinn und Geschick wußte er die Erscheinungen so zu verfolgen, daß fast alles, was wir von ihnen wissen, sein Werk ist. Man muß in den Originalberichten Faradays nachlesen, wie viele mühevolle und schwierige Versuche fehlschlugen, wie endlich nach einer großen Reihe von vielfach variierten Experimenten sich eine Spur der Wirkung zeigte, welche er suchte, und wie er dann diese Spur verfolgte und ausbeutete, um einen richtigen Begriff von Faradays Genie zu bekommen. Jetzt, wo diese Erscheinungen genau bekannt sind, ist es nicht mehr nötig, den mühevollen stufenweisen Weg zu gehen, den Faraday einschlagen mußte, jetzt können wir bald mitten in die Erscheinungen hineingreifen und von vornherein diejenigen Bedingungen annehmen, die sich als vorteilhaft erwiesen haben.

Immer, wenn ein elektrischer Strom in einem Stromkreis geöffnet oder geschlossen wird, entsteht in einem in der Nähe befindlichen geschlossenen Leiter ein momentaner elektrischer Strom.

Die beiden Leiterkreise sind also ganz voneinander getrennt, es existiert gar keine leitende Verbindung zwischen ihnen, und doch entsteht durch das Öffnen und Schließen eines von einem Strome durchflossenen Leiters in einem eben noch ganz stromlosen geschlossenen Drahtkreis ein momentaner galvanischer Strom. Um diese Erscheinung leicht hervor-

zurufen, ist es notwendig, daß die beiden Stromkreise sich sehr nahe aneinander befinden. Man nimmt deshalb am besten zwei Hohlzylinder von Holz und wickelt auf jeden von ihnen einen Draht spiralförmig auf. Den engeren Zylinder stellt man in die Höhlung des weiteren hinein. So hat man zwei getrennte Drähte, die einander sehr nahe sind. In Fig. 202 sind diese beiden Zylinder mit P und S bezeichnet. Die Enden des Drahtes auf dem weiten Zylinder S sind nach zwei Klemmschrauben c und d geführt, die des Drahtes auf dem engen Zylinder P nach a und b. Nun verbindet man die äußere Spule mit einem Galvanoskop G und die innere Spule unter Einschaltung eines Unterbrechers U (wie er in Fig. 61 dargestellt wurde) mit einem Element E (hier einem Akkumulator). Man hat so zwei geschlossene Leiterkreise; in dem inneren fließt fortwährend

Fig. 202.



ein Strom, in dem äußeren nicht. Sowie man aber nun den Strom in dem inneren Drahtkreis unterbricht, indem man den Bügel B, wie es in der Figur gezeichnet ist, aus den Quecksilbernäpfchen des Unterbrechers herausnimmt, wird die Nadel des Galvanoskops momentan abgelenkt, kehrt aber sofort wieder zurück. Sowie man den Strom in der inneren Spirale wieder schließt durch Eintauchen des Bügels B, wird die Nadel wieder abgelenkt, aber ebenfalls nur einen Moment und kehrt auch sofort wieder zurück. Es wird also in der Tat durch die Öffnung oder Schließung des Stromes in P ein momentaner Strom in dem Leiter S erregt, in dem Leiter, welcher gar keine Verbindung mit P hat, welcher nur in der Nähe von P sich befindet. Man nennt diese momentanen Ströme Induktionsströme und kann also sagen, beim Öffnen und Schließen des Stromes in P wird in S ein momentaner Strom induziert. Man nennt die Spule P die induzierende Spule, die Spule S die induzierte oder Induktionsspule. Die Induktionsspule S wird gewöhnlich aus sehr feinem Kupferdraht verfertigt, welcher mit Seide umsponnen ist, damit man viele Windungen nebeneinander und übereinander

bringen kann, ohne daß sie in leitende Verbindung kommen. Die Spule P besteht aus dickem Kupferdraht, damit der Strom in ihr recht stark wird.

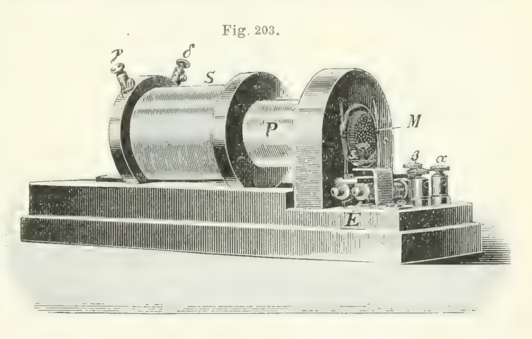
Wenn man aber die durch die momentanen Induktionsströme hervorgebrachten Ausschläge der Nadel des Galvanoskops betrachtet, so findet man, daß ein Unterschied in der Richtung des Ausschlages stattfindet, je nachdem der induzierende Strom geöffnet oder geschlossen wird. Wird der induzierende Strom geöffnet, so geht die Nadel nach der einen Seite, wird er geschlossen, so geht sie nach der anderen Seite. Aus der Richtung der Nadelablenkung kann man aber schließen, in welcher Richtung der positive Strom durch die induzierte Spule läuft, und so findet man, daß der induzierte Strom, der durch Schließen entsteht, in entgegengesetzter Richtung durch die Induktionsspule läuft wie der induzierende Strom durch die induzierende Spule, daß dagegen der Induktionsstrom, der durch Öffnen entsteht, dieselbe Richtung hat wie der Strom in der induzierenden Spule.

Man bezeichnet den induzierenden Strom, also den in der Spule P, auch oft als den primären Strom, den induzierten als sekundären Strom und kann also sagen:

Der Induktionsstrom (sekundäre Strom) hat beim Schließen die entgegengesetzte, beim Öffnen die gleiche Richtung wie der primäre Strom.

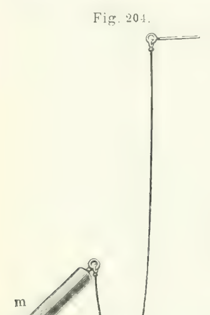
Taucht man rasch hintereinander den Bügel B in die Quecksilbernäpfchen ein und zieht ihn wieder heraus, so bekommt man also rasch hintereinander momentane Induktionsströme nach der einen und nach der anderen Richtung. Wenn diese Ströme sehr rasch hintereinander folgen, so daß sich ein Strom nach der einen Richtung sehr rasch an den vorhergehenden nach der anderen Richtung anschließt, so nennt man sie Wechselströme. Es kann also ein Stromkreis auch von Wechselströmen durchflossen werden, ebenso wie er von einem Strom von gleichbleibender Richtung durchflossen wird. Es ist natürlich nicht möglich, dadurch, daß man den Draht aus dem Quecksilber mit der Hand herausnimmt und wieder einsteckt, sehr schnell wechselnde Ströme in der Induktionsspule zu bekommen. Wenn man aber den primären Strom, bevor er in seine Spule kommt, durch einen Neefschen Hammer (S. 184) gehen läßt, so bewirkt dieser ja selbsttätig rasch aufeinander folgende Schließungen und Öffnungen des Stromes und man bekommt daher in der induzierten Spule fortwährend Induktionsströme, bald nach der einen, bald nach der anderen Richtung. Eine Einrichtung dazu zeigt Fig. 203.

Fig. 203.



Von einem Element geht der Strom zu den beiden Klemmen α und β und von diesen um den Elektromagneten E des Neefschen Hammers, der hier horizontal liegt, dann durch die primäre Spule P des Induktionsapparates und von dieser durch die Spitze s und die Feder des Hammers zum Element zurück. Sobald der Strom in der primären Spule fließt, wird die Feder angezogen und dadurch der Strom unterbrochen. Die Feder schnellt dann wieder zur Spitze und schließt den Strom wieder. Bei jeder Öffnung und Schließung entsteht dann in der sekundären Spule S ein Induktionsstrom. Solche wechselnde Ströme werden vielfach für medizinische Zwecke benutzt, man nennt sie in der Medizin faradische Ströme. Man führt dann die Enden der induzierten Spule, die zu den Klemmen γ und δ geleitet sind, in zwei Messingzylinder, wie in Fig. 204, und gibt diese dem zu elektrisierenden Menschen in die Hände. Dann gehen die Wechselströme durch den menschlichen Körper und üben in gewissen Fällen heilsame Wirkungen aus.

Fig. 204.



Die sekundäre Spule S ist bei diesem Apparat, der von Dubois Reymond konstruiert wurde, auf einem Schlitten beweglich, so daß sie mehr oder minder über die primäre Spule P geschoben werden kann. Man nennt deswegen diesen Apparat den Du Boisschen Schlittenapparat.

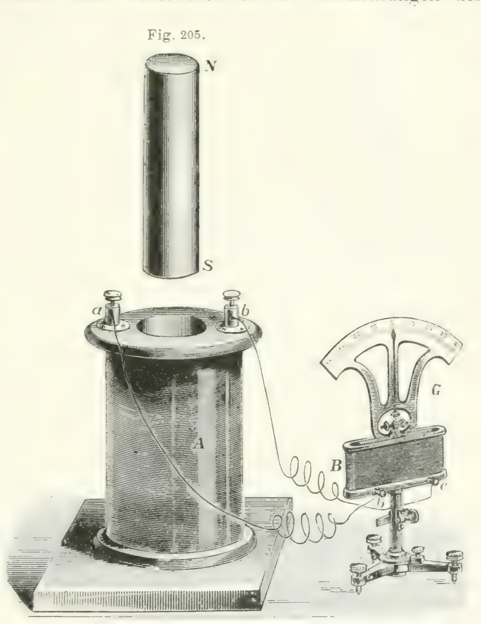
Bei jeder Öffnung und bei jeder Schließung des primären Stromes werden also in der Induktionsspule momentane Ströme erzeugt. Es ist aber gar nicht einmal nötig, einen Strom ganz zu unterbrechen, um einen Induktionsstrom zu bekommen. Schon jede Schwächung oder Verstärkung des primären Stromes erzeugt in der Induktionsspule einen Induktionsstrom, und zwar hat in bezug auf die Richtung des erzeugten Induktionsstromes die Schwächung dieselbe Wirkung wie die Öffnung, während die Verstärkung dieselbe Wirkung hat wie die Schließung.

Ja noch mehr. Es ist nur nötig, die eine Spule gegen die andere irgendwie zu verschieben, um einen momentanen Induktionsstrom zu bekommen. Wenn man durch die primäre Spule P, die in Fig. 203 gezeichnet ist, ohne Benutzung des Hammers einen konstanten Strom fließen läßt (indem man etwa die Spitze so fest an die Feder anlegt, daß sie sich nicht trennen können) und die Induktionsspule S nur über sie weg zieht oder schiebt, so erhält man in S schon einen Induktionsstrom. Schiebt man S nach der einen oder anderen Seite, so erhält man jedesmal einen Induktionsstrom, aber beide Male von entgegengesetzter Richtung. Bei dieser Näherung und Entfernung der beiden Spulen ist es ganz gleichgültig, ob die primäre Spule beweglich und die sekundäre, induzierte, fest ist, oder ob umgekehrt die primäre Spule fest und die sekundäre beweglich ist. Nähert man die primäre und die induzierte Spule einander, so fließt der Induktionsstrom in S in entgegengesetzter Richtung wie in P, also ebenso wie beim Schließen des Stromes. Entfernt man dagegen S von P, so hat der

Induktionsstrom in S dieselbe Richtung wie der Strom in P. Beim Entfernen hat also der Induktionsstrom dieselbe Richtung wie beim Öffnen.

Die vielen Beziehungen, die wir zwischen galvanischen Strömen und Magneten gefunden haben, lassen es nun voraussehen, daß auch Magnete in eben derselben Weise induzierend wirken können wie Stromkreise. Und hiermit sind wir zu einer Reihe von Erscheinungen gekommen, die der Elektrizität eine gewaltige Wirksamkeit verschafft haben, zu Erscheinungen, welche die Grundlage der ganzen modernen Entwicklung der Elektrotechnik bilden. Man bezeichnet sie als Erscheinungen der Magnetoinduktion und im Gegensatz dazu die eben behandelten Fälle als solche der Elektroinduktion.

Fig. 205.



Da ein Magnet sich bekanntlich genau so verhält, als ob er aus einer großen Menge von gleichgerichteten Molekularströmen bestände, so muß die Annäherung eines Magnets an eine geschlossene Drahtspule einen momentanen Induktionsstrom erzeugen, und ebenso muß durch die Entfernung des Magnets ein momentaner Induktionsstrom in der Drahtspule erzeugt werden. Diese Folgerung aus unseren bisherigen Kenntnissen zeigt sich nun in der Tat bestätigt. Wenn man in Fig. 205 den Magnetstab NS in die Drahtspule A, deren Enden durch ein Galvanoskop G verbunden sind, hineinstößt, so entsteht in der Spule ein momentaner Induktionsstrom, der die Magnetnadel des Galvanoskops zum Ausschlag bringt. Zieht man den Magneten aus der Drahtspule wieder heraus, so erhält man wieder einen momentanen Induktionsstrom, der aber nach der entgegengesetzten Richtung fließt. Aber nicht bloß das Hinein- oder Herausschieben, sondern jede Lagenänderung eines Magneten in bezug auf die Drahtspule bringt einen Induktionsstrom hervor. Über die Richtung der Induktionsströme könnte man sich auch sofort klar werden, wenn man sich die Molekularströme gezeichnet denkt.

Es lassen sich jedoch alle Fragen über die Richtung der Induktionsströme bei der Annäherung oder Entfernung von Strömen oder Magneten an Drahtkreise sehr einfach in ein Gesetz zusammenfassen, wenn man an die Anziehung und Abstoßung denkt, die ein Stromkreis auf einen anderen oder ein Stromkreis auf einen Magneten ausübt.

Man kann dieses Gesetz folgendermaßen aussprechen: Bei jeder Bewegung eines Stromes oder eines Magneten in der Nähe eines Drahtkreises entsteht in dem letzteren ein Strom. Dabei ist es ganz gleichgültig, ob der Strom resp. der Magnet sich gegen den Drahtkreis bewegt, oder der Drahtkreis gegen den Strom resp. Magneten. Die Richtung des entstehenden induzierten Stromes ist immer eine solche, daß derselbe vermöge der elektrodynamischen (oder elektromagnetischen) Wirkung auf den induzierenden Strom resp. Magneten diesem die entgegengesetzte Bewegung erteilen würde.

Wird also z. B. in Fig. 205 der Südpol S von der Spule A entfernt, so muß der Strom in ihr diejenige Richtung erlangen, daß der Südpol angezogen wird. Nach unseren Betrachtungen auf S. 179 und insbesondere nach Fig. 163 II wird aber ein Südpol angezogen, wenn der Strom in der Spule die dort gezeichnete Richtung hat, d. h. vom angegriffenen Pol aus gesehen im umgekehrten Uhrzeigersinne fließt. Dies ist also auch die Richtung des entstehenden Induktionsstromes.

Dieses allgemeine Gesetz ist von Lenz ausgesprochen worden und heißt das Lenzsche Gesetz.

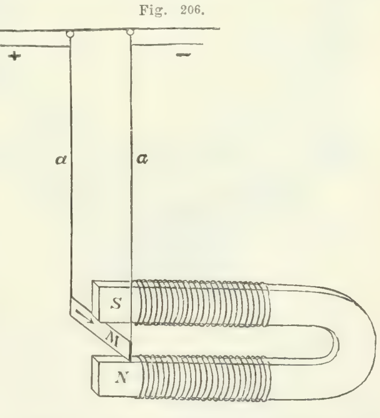
Das Lenzsche Gesetz hat übrigens eine tiefere Bedeutung. Es ist nämlich ein Ausdruck dafür, daß auch bei den Induktionsströmen das Gesetz von der Erhaltung der Energie gültig ist. Nehmen wir an, um das einzusehen, daß wir zwei Stromspulen A und B haben, in welchen je ein Strom nach derselben Richtung zirkuliert. Die Spule A sei fest, B sei beweglich. Wir wissen aus dem elektrodynamischen Gesetz von Ampère, daß zwei gleichgerichtete Ströme sich anzuziehen suchen. Folglich bewegt sich der Stromkreis B auf A zu, er wird von A angezogen. Bei dieser Anziehung leisten aber die elektrischen Kräfte, die von A ausgehen, eine gewisse Arbeit. Woher kommt diese Arbeit? Welches ist ihr Äquivalent? Denn umsonst bekommen wir ja keine Arbeit in der Natur. Sie kann also nur geliefert werden auf Kosten der Energie des Stromes, welcher in A fließt. Diese Energie, die in jeder Sekunde gleich dem Produkt aus der elektromotorischen Kraft des Elementes und der Stromstärke im Kreise A ist, wird, wenn sonst keine äußere Arbeit geleistet wird, durch den Strom ganz in Joulesche Wärme verwandelt. Leistet der Strom aber noch eine positive Arbeit, wie hier, wo er den Strom B anzieht, so folgt daraus, daß die Joulesche Wärme in A um den ganzen Betrag dieser Arbeit kleiner sein muß, als wenn keine Arbeit geleistet wird. Da nun die Joulesche Wärme von dem Widerstand des Stromkreises und der Stromstärke abhängt, der Widerstand aber ja unverändert bleibt, so folgt, daß die Stromstärke in unserem Kreise A kleiner sein muß, wenn er den Kreis B anzieht, als wenn er das nicht tut. Die Folge der Bewegung von B nach A hin ist also

eine Verringerung der Stromstärke in A, d. h. die Erzeugung eines neuen Stromes (Induktionsstromes), welcher dem vorhandenen entgegenfließt und ihn dadurch schwächt. Das ist nun in der Tat der Ausdruck des Lenzschen Gesetzes. Denn da der ursprüngliche Strom in A der Annahme nach den Strom B anzuziehen suchte, so wird also durch die Annäherung von B an A in letzterem ein Strom erzeugt, welcher B abzustoßen sucht.

Was hier in dem einen Beispiel ausführlich entwickelt wurde, ist nun in allen anderen Fällen ganz ebenso durchzuführen, so daß wir also behaupten dürfen, das Lenzsche Gesetz ist eine notwendige Folge des Satzes von der Erhaltung der Energie.

Nicht immer aber ist es einfach möglich, die Richtung des induzierten Stromes aus dem Lenzschen Gesetz abzuleiten. Die Anwendung dieses Gesetzes ist einfach und leicht, wenn es sich um die Magnetoinduktion handelt, die von einem Pol hervorgebracht wird, wobei andere Pole so entfernt sind, daß ihre Wirkung zu vernachlässigen ist. In Wirklichkeit kommen aber gerade sehr oft solche Fälle vor, bei denen ein Stromleiter sich in einem magnetischen Feld bewegt, das zwischen zwei verschiedenen Polen vorhanden ist. Für diesen Fall ist es am bequemsten, die Richtung des durch Bewegung entstehenden Induktionsstromes auch durch eine Fingerregel darzustellen, so wie wir oben (S. 182) die elektromagnetische Bewegung durch eine solche dargestellt haben. Hatten wir aber damals die Finger der linken Hand nehmen müssen, so werden wir jetzt, wegen des Lenzschen Gesetzes, die der rechten Hand anzuwenden haben. Wir halten also von der rechten Hand den Zeigefinger in die Richtung der magnetischen Kraftlinien, den Daumen in die Richtung der Bewegung des induzierten Stromleiters, dann gibt der Mittelfinger die Richtung des entstehenden Induktionsstromes an. Diese Regel bezeichnet man als Rechte-Hand-Regel. An dem einfachen Beispiel, das wir schon oben S. 183 zur Untersuchung der Bewegung benutzt haben, die ein Strom in einem magnetischen Feld erfährt, können wir unsere Regel leicht anwenden. Bewegen wir das Drahtstück M (Fig. 206) nach rechts durch das Magnetfeld, so ist der rechte Daumen nach rechts, der rechte Zeigefinger von unten nach oben zu halten, folglich geht der rechte Mittelfinger von hinten nach vorn und gibt uns die Richtung des dabei entstehenden Induktionsstromes an.

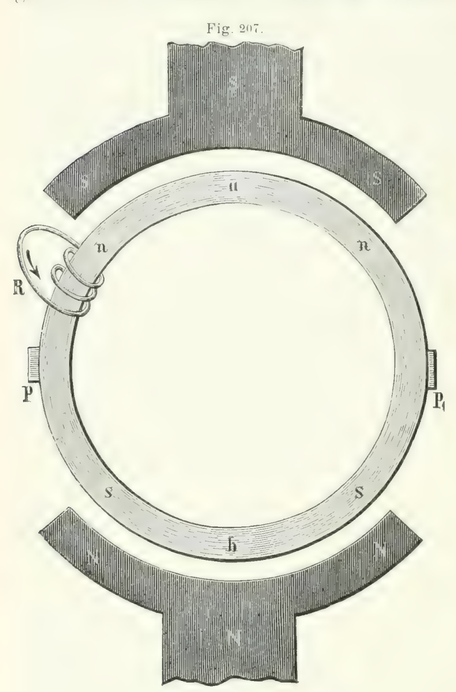
Fig. 206.



Ein anderes Beispiel für die Anwendung dieser Regel ist durch Fig. 207 gegeben, welche das Schema einer Dynamomaschine darstellt. In dieser ist ein eiserner Ring gezeichnet, der im Zwischenraum zwischen einem

südmagnetischen Polschuh S und einem nordmagnetischen Eisenkern N sich befindet. Der Eisenring wird durch magnetische Induktion selbst magnetisch, oben nordmagnetisch n n, unten südmagnetisch s s. Wenn nun eine Drahtrolle R oben über den Ring hin von links nach rechts bewegt wird, so muß der in ihr entstehende Induktionsstrom die Richtung des gezeichneten Pfeiles haben. Denn wir haben den Zeigefinger der rechten Hand von n nach S zu halten, den Daumen der rechten Hand nach rechts, dann geht der Mittelfinger von hinten nach vorn, wie der gezeichnete Pfeil.

Fig. 207.



Diese Fingerregel oder das Lenzsche Gesetz und ebenso eine weitere Regel, die wir bald kennen lernen werden, geben uns aber nur eben Aufschluß über die Richtung des entstehenden Induktionsstromes. Wir müssen uns aber auch über die Stärke dieses Stromes und überhaupt über die genaueren quantitativen Gesetze dieser Erscheinungen informieren.

Immer, wenn Elektrizität durch einen Drahtkreis fließt, muß eine elektromotorische Kraft vorhanden sein, welche die Elektrizität eben in Bewegung setzt. Wir müssen daher auch hier, bei den Induktionsströmen, zuerst nach der elektromotorischen Kraft der induzierten Ströme fragen.

Zunächst scheint bei dieser Untersuchung eine Schwierigkeit darin zu liegen, daß wir es ja mit zweierlei, scheinbar verschiedenen Arten von Induktion, der Elektroinduktion und der Magnetoinduktion zu tun haben. Indes schon das Lenzsche Gesetz, das in beiden Fällen die Richtung des entstehenden Induktionsstromes in gleicher Weise auszudrücken lehrt, zeigt an, daß diese beiden Arten der Induktion auf eine und dieselbe Ursache zurückgeführt, also gleichartig behandelt werden können. In der Tat wissen wir ja bereits, daß ein Magnet und ein elektrischer Strom sich in der Beziehung ganz gleich verhalten, daß nämlich beide magnetische Kräfte ausüben.

Die magnetischen Kräfte eines Stromes sind es, ebenso wie

die magnetischen Kräfte eines Magneten, welche die Induktionsströme in einem in der Nähe sich bewegenden Stromleiter hervorrufen. Dadurch sind die beiden Arten von Induktion auf dieselbe Erscheinung zurückgeführt; die Elektroinduktion ist ebenfalls eine Magnetoinduktion, indem nämlich die magnetischen Kräfte des primären Stromes die Induktion erzeugen.

Daraus folgt aber, daß wir am leichtesten und übersichtlichsten die quantitativen Verhältnisse der Induktionsströme werden darstellen können, wenn wir in allen Fällen Gebrauch machen von den *magnetischen Kraftlinien*, die ja sowohl in der Nähe eines Magneten, wie in der Nähe eines galvanischen Stromes vorhanden sind. Wenn sich ein Drahtstück in der Nähe eines Magneten bewegt, so durchschneidet es im allgemeinen immer die Kraftlinien desselben und ebenso, wenn es sich in der Nähe eines Stromkreises bewegt. Dieses Durchschneiden der Kraftlinien ist es, welches die Ursache für die Induktion ist. Wenn andererseits ein primärer Strom erst entsteht, so gehen von ihm aus die Kraftlinien nach außen und schneiden also wieder ein irgendwo in der Nähe befindliches Leiterstück. Wird umgekehrt der primäre Strom geöffnet, nachdem er bis dahin bestanden hat, so verschwinden die Kraftlinien; man kann sich vorstellen, daß sie allmählich von außen in den Stromkreis hineinrücken und dort aufhören; dabei schneiden sie also auch wieder ein in der Nähe befindliches Leiterstück. Kurz, in jedem Falle der Induktion finden wir, daß Kraftlinien die einzelnen Teile der induzierten Strombahn schneiden, indem sie entweder in der einen Richtung oder in der anderen Richtung durch die induzierten Leiter hindurchgehen.

Wenn wir einen Drahtkreis nehmen, dessen Enden mit einem Galvanometer verbunden sind, so können wir in diesem Draht auf verschiedenfache Weise Induktionsströme erzeugen und am Galvanometer beobachten. Jedes einzelne Stück des Drahtes wird dabei von Kraftlinien durchschnitten, bald in dem einen, bald in dem anderen Sinne. Im ganzen treten dadurch in die von dem Drahtkreis umschlossene Fläche entweder Kraftlinien ein oder aus ihr aus, es wird die Zahl der Kraftlinien, die die Fläche umfaßt, vermehrt oder vermindert oder sie bleibt gleich. Die Geschwindigkeit, mit der diese Kraftlinienzahl sich ändert, diese ist es nun allein, welche die erzeugte elektromotorische Kraft bestimmt. *Je größer die Kraftlinienzahl ist, die pro Sekunde in die Fläche hineintritt oder aus ihr heraustritt, je größer also, wie wir es nennen wollen, die Geschwindigkeit ist, mit der die Kraftlinienzahl in der Fläche sich vermehrt oder vermindert, um so größer ist die erzeugte elektromotorische Kraft der Induktion.* Und dabei bringen austretende Kraftlinien immer einen Strom im Uhrzeigersinne hervor, wenn man den Drahtkreis in der Richtung der Kraftlinien ansieht, eintretende einen solchen im entgegengesetzten Sinne. Bleibt die vom Stromkreis umfaßte Kraftlinienzahl bei der Bewegung unverändert, so wird auch keine elektromotorische Kraft induziert.

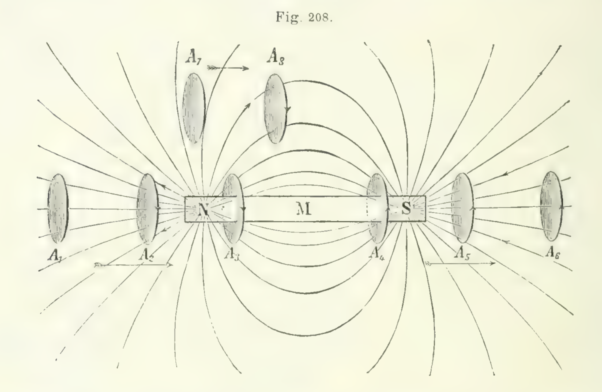
Aus diesem allgemeinen Gesetz folgt zunächst: *je stärker der induzierende Magnet oder der induzierende Strom ist, um so größer ist bei sonst gleichen Verhältnissen die elektromotorische Kraft in der indu-*

zierten Spule. Denn in der Nähe eines stärkeren Magneten oder Stromes sind mehr Kraftlinien pro Quadratzentimeter vorhanden, als bei schwächerem Magnete oder Strom.

Ferner folgt daraus: je rascher der primäre Strom oder Magnet in seiner Stärke oder in seiner Lage verändert wird, um so größer ist die elektromotorische Kraft des Induktionsstromes. Je rascher, also auch je plötzlicher die Unterbrechungen eines primären Stromes stattfinden, um so größer wird die elektromotorische Kraft des induzierten Stromes.

Und endlich drittens: je größer die Anzahl der Windungen der induzierten Spule ist, um so größer wird die elektromotorische Kraft des induzierten Stromes. Denn jede Windung umfaßt eine Anzahl Kraftlinien, und

Fig. 208.



die gesamte Zahl der Kraftlinien, die pro Zeiteinheit ein- oder austreten, ist daher um so größer, je mehr Windungen die Spule hat. Von dem Material des induzierten Drahtes ist die erzeugte elektromotorische Kraft ganz unabhängig.

Wir könnten die Größe der elektromotorischen Kraft des Induktionsstromes direkt gleichsetzen der Zahl der pro Sekunde in die Fläche hinein- oder aus ihr herausgehenden Kraftlinien. Indes wäre diese Einheit für praktische Zwecke zu klein. Man ist daher übereingekommen, diejenige elektromotorische Kraft als Einheit zu nehmen, bei der nicht eine, sondern 100 Millionen (10^8) Kraftlinien in der Zeiteinheit in die Fläche ein- oder aus ihr austreten. Diese Einheit ist gerade das Volt, das wir schon immer angewendet haben. Wir haben z. B. in Fig. 208 ein Bild der Kraftlinien eines Magnetstabes. Nehmen wir nun einen Drahtkreis, wie den bei A_1 gezeichneten, der eine bestimmte Fläche umschließt, und nähern wir ihn dem Nordpol bis A_2, so erkennt man, daß dabei mehr Kraftlinien durch ihn hindurchgehen als früher. An der Stelle A_1 durchsetzen drei Kraftlinien die Stromfläche, an der Stelle A_2 aber sieben. Wenn

sich folglich die Stromfläche in 1 Sekunde von A_1 bis A_2 bewegen würde, so würde die elektromotorische Kraft durch die Zahl 4 ausgedrückt sein. Bewegt sich aber die Stromfläche in $\frac{1}{1000}$ Sekunde von A_1 bis A_2, so ist die elektromotorische Kraft durch die Zahl 4000 dargestellt. Nach unserer Festsetzung wäre in diesem zweiten Fall die elektromotorische Kraft 0,00004 Volt. Rückt die Fläche bis zum Nordpol N, so treten dabei am meisten Kraftlinien ein; rückt sie weiter, so nimmt die Induktion wieder ab und an der Stelle M bringt eine kleine Bewegung der Drahtfläche keine neuen Kraftlinien mehr hinein. Dort ist also der Induktionsstrom Null. Bei weiterem Fortschreiten treten mehr und mehr Kraftlinien aus der Fläche aus. Der Induktionsstrom bekommt daher die entgegengesetzte Richtung, wie sich zeigt, wenn man den Drahtkreis von A_4 über A_5 nach A_6 schiebt. Ebenso kann man aus der Zahl der eintretenden Kraftlinien die Richtung und die Größe der elektromotorischen Kraft bestimmen, wenn die Fläche sich oberhalb oder unterhalb des Magnetes, wie von A_7 nach A_8, bewegt.

Dasselbe Verfahren findet auch bei der Elektroinduktion seine Anwendung. Denn da jeder Stromkreis mit magnetischen Kraftlinien behaftet ist, so schneidet der sekundäre Leiter, wenn er dem primären Strom sich nähert oder sich von ihm entfernt, die Kraftlinien desselben und dadurch entsteht der Induktionsstrom. Wird der primäre Leiter unterbrochen, so verschwinden seine Kraftlinien, sie gehen also durch die Fläche des sekundären hindurch und erzeugen Induktion.

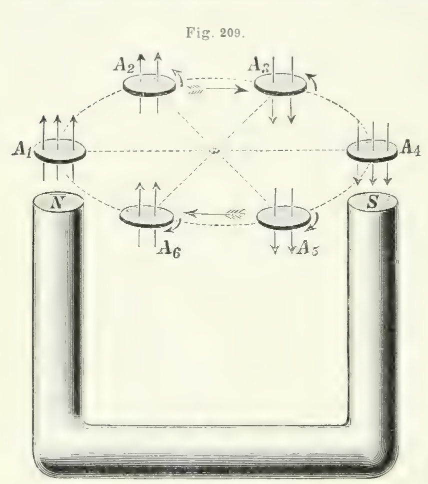
Eine direkte wichtige Anwendung läßt sich von diesem Gesetz der Induktion machen zur Bestimmung der magnetischen Feldstärke (oder was dasselbe ist, der Zahl der Kraftlinien) (S. 165) in starken magnetischen Feldern. Wenn wir z. B. bei dem Duboisschen Ringelektromagnet Fig. 148 S. 164 die Stärke des Feldes zwischen den Polschuhen f f bestimmen wollen, so nehmen wir einen kleinen Drahtkreis oder eine flache Drahtspule, die wir mit einem ballistischen Galvanometer (S. 197) verbinden und die wir senkrecht zu den Kraftlinien in das Feld stellen. Wenn wir nun sehr rasch diese Spule aus dem Feld herausbewegen, so wird in ihr ein Induktionsstrom erregt, bei dem wir die gesamte in Bewegung gesetzte Elektrizitätsmenge durch den ersten Ausschlag des ballistischen Galvanometers messen. Diese aber ist, wenn der Widerstand der Drahtspule bekannt ist, ein direktes Maß für die Zahl der Kraftlinien des Feldes, die wir bestimmen wollen. Auf diese Weise kann man solche starken magnetischen Felder direkt ausmessen und danach z. B. eine Wismutspirale (S. 165) ein für allemal eichen.

Um auch mittels der Kraftlinienvorstellung die Richtung des Induktionsstromes immer unzweifelhaft festzustellen, ist von Maxwell folgende Regel aufgestellt worden, die man die Maxwellsche Regel nennt: Man blicke auf die induzierte Spule immer in der Richtung der Kraftlinien (die vom Nordpol ausgehen und durch die Luft zum Südpol hingehen). Dann bringen austretende Kraftlinien immer einen Strom im Uhrzeigersinn, eintretende einen im entgegengesetzten Sinne hervor.

Vermittels der Betrachtung der Kraftlinien läßt sich nun in jedem Falle die Richtung des Induktionsstromes und die Größe der elektromotorischen Kraft bestimmen, die in einer Spule durch Bewegung induziert wird.

In vielen Fällen wird eine Änderung der Zahl der Kraftlinien, die einen Stromkreis durchsetzen, dadurch erreicht, daß sich die Ebene des Stromkreises gegen die Kraftlinien dreht. Das ist z. B. gerade der Fall bei der Bewegung, die wir in Fig. 207 schon betrachtet haben. Wenn dort die Drahtrolle R von p nach p_1 sich bewegt, so dreht sie ihre Fläche. Bei p ist die Fläche horizontal, bei a vertikal, bei p_1 wieder horizontal, jedoch so, daß dort Oberseite und Unterseite gegen p vertauscht sind. Die Kraftlinien gehen bei dieser Anordnung oben im wesentlichen vertikal in dem Zwischenraum zwischen n und S von unten nach oben. Folglich umfaßt die Rolle R bei p am meisten Kraftlinien, weil ihre Fläche dort horizontal ist, bei der Bewegung bis a treten immer mehr Kraftlinien aus, der Strom zirkuliert also in der Rolle, von unten gesehen, wie der Uhrzeiger. Bei der Bewegung von a bis p_1 treten mehr Kraftlinien in die Fläche ein, die Seiten der Fläche haben sich aber vertauscht, so daß der Strom immer weiter in demselben Sinne zirkuliert. Die entgegengesetzte Richtung hat der Strom in der unteren Hälfte der Figur.

Fig. 209.



Auch der umgekehrte Fall kommt vor, daß nämlich die Fläche des Stromkreises bei der Bewegung sich zwar parallel bleibt, daß aber die Kraftlinien des Magnetfeldes gegen die Fläche andere und andere Neigung besitzen. Ein solcher Fall ist z. B. in Fig. 209 dargestellt. In dieser ist ein Hufeisenmagnet N S gezeichnet. Oberhalb der Pole desselben dreht sich ein einfacher Drahtkreis im Sinne des Uhrzeigers von A_1 über A_4 nach A_1 zurück, wobei die Fläche desselben sich immer parallel bleibt. Die Kraftlinien gehen vom Nordpol N aus nach allen Seiten in die Luft und gehen zum Südpol S hin. Wenn die Spule in der Lage A_1, über dem Pole N steht, gehen alle Kraftlinien des Poles durch sie hindurch; fängt sie an, sich fortzubewegen, so treten mehr und mehr Kraftlinien aus ihr heraus, also fließt, nach der Maxwellschen Regel (S. 219), in der Richtung der Kraftlinien gesehen, der Strom in ihr im Sinne des Uhrzeigers. Ist die Spule bis A_2 gekommen, so ist nach der Zeichnung eine Kraftlinie aus ihr ausgetreten, von unten gesehen fließt also der Strom in der Uhrzeigerrichtung, also von oben gesehen entgegen-

gesetzt, wie der Pfeil bei A_2 zeigt. Geht die Spule weiter bis A_3, also über die Mitte ihres Weges, so dringen wieder immer mehr Kraftlinien in sie hinein, aber von oben, so daß also von oben gesehen der Strom umgekehrt wie ein Uhrzeiger sich bewegt. Daraus folgt, daß sich die Richtung des Stromes auf dem ganzen Wege von A_1 über A_2 und A_3 bis A_4 nicht ändert, wenn die Spule vom Nordpol zum Südpol sich dreht. Dreht sie sich aber weiter von A_4 über A_5 und A_6, so dringen die von oben hereinkommenden Kraftlinien seitlich heraus und zugleich dringen von unten immer neue herein, so daß auf dem Weiterweg der Strom wie der Uhrzeiger fließt, während sich die Spule von S nach N dreht. Die Umkehrung des Stromes findet also statt, während die Spule gerade über den Polen sich vorbeibewegt. Am größten ist die elektromotorische Kraft und daher auch der Strom dann, wenn die Spule gerade um 90° von den Polen entfernt ist. Denn dort treten bei der Bewegung von unten die Kraftlinien aus, von oben die Kraftlinien ein, die Änderung der Zahl der Kraftlinien, die in demselben Sinne die Fläche durchsetzen, ist also dort am größten. Bei jeder halben Umdrehung des Magnetes oder der Drahtspule wird also die Richtung des Induktionsstromes in der Spule verändert. Die Spule wird also von Wechselströmen durchflossen.

Die Einrichtung, die hier schematisch beschrieben wurde, ist nun in ähnlichen Formen vielfach wirklich ausgeführt. In dem Apparat in Fig. 210 z. B. liegt ein kräftiger Magnet auf einer Unterlage, und vor seinen Polen werden zwei Spulen R und R′, die auf Eisenkernen aufsitzen, vermittels eines Rades in rasche Rotation versetzt. Damit die in beiden Spulen entstehenden entgegengesetzten Ströme sich nicht aufheben, sondern im Gegenteil verstärken, müssen die Windungen zweckmäßig ineinander übergehen, nämlich so, daß die beiden Eisenkerne in entgegengesetzter Richtung mit Draht umwickelt sind. Um von den beiden Enden des Drahtes dieser Rollen den Strom nach außen durch einen beliebigen Draht WW leiten zu können, werden diese Enden in zwei voneinander isolierte Ringe auf der metallischen Achse geführt, welche also mit der Achse und mit den Spulen sich drehen. Auf diesen Ringen schleifen nun zwei Metallfedern a und b, welche also immer mit den Enden der Spulen in Verbindung sind. Sie bilden dadurch die festen Enden der beweglichen Spulendrähte.

Verbindet man diese Schleiffedern durch irgend einen Leiter WW, einen Apparat oder auch durch den menschlichen Körper, so fließen durch diesen Leiter die Wechselströme hindurch, die in den beweglichen Spulen erzeugt werden.

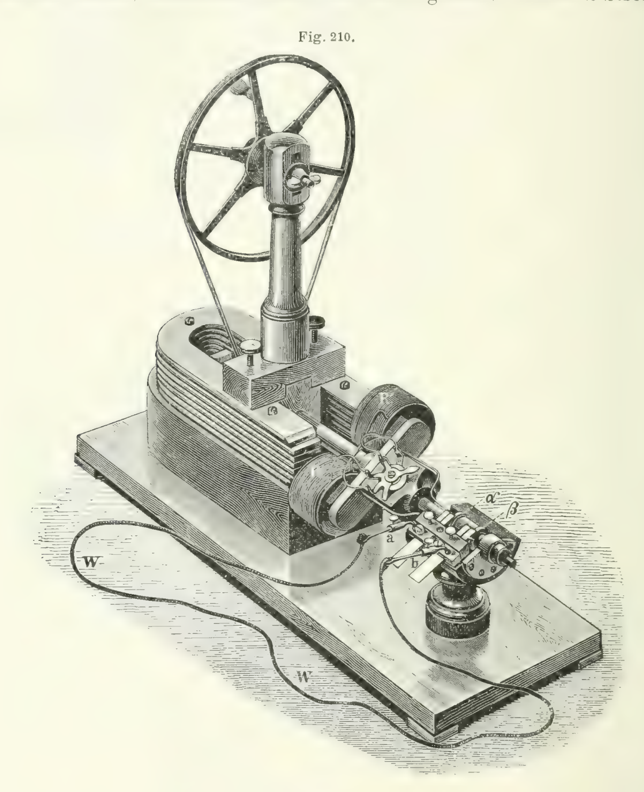
Man nennt eine solche Maschine eine magnetelektrische Maschine.

Jedesmal, wenn die beiden Spulen eine halbe Umdrehung gemacht haben, entsteht ein Strom von entgegengesetzter Richtung, da das eine Mal der positive Stromimpuls nach a, das andere Mal nach b hin gerichtet ist. Wenn man es nun aber einrichtet, daß immer, wenn die Achse halb umgedreht wird, auch ein Kommutator umgelegt wird, durch den der Strom von den Spulen zuerst geführt wird, so ist klar, daß dann durch den Draht zwischen a und b die Ströme fortwährend in derselben Richtung fließen müssen. Ein solcher Kommutator ist in der Tat an dieser Maschine

angebracht. Man erhält durch ihn in dem Schließungskreise eine große Menge von aufeinanderfolgenden Strömen derselben Richtung, die von einem kontinuierlichen Strom nicht zu unterscheiden sind, wenn nur die Rotation der Drahtspulen eine sehr rasche ist.

Die bloße Aufwendung von Arbeit, um die Spulen vor den Magnetpolen zu drehen, hat uns also hier in den Stand gesetzt, elektrische Ströme

Fig. 210.

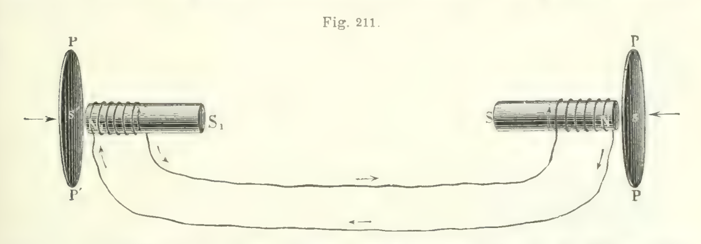


zu erzeugen. In den galvanischen Ketten wird, wie wir gesehen haben, der elektrische Strom dadurch erzeugt, daß Zink in ihnen aufgelöst wird. Die bei der Auflösung des Zinks entwickelte chemische Energie setzt sich direkt in elektrische Energie um. In den Thermosäulen haben wir die Energie der Wärme in elektrische Energie verwandelt. Jetzt haben wir direkt die Energie der Bewegung, die Arbeit, die wir zum Drehen unserer Spulen verwendet haben, in elektrische Energie umgesetzt. Dies ist der Punkt, an welchem die moderne Elektrotechnik mit Macht angegriffen

hat und von dem aus sie ihre glänzenden Resultate erlangt hat. Wie sich die Entwickelung von dieser ersten, noch ziemlich primitiven Maschine, welche Arbeit in elektrische Energie verwandelt hat, bis zu den heutigen Riesenmaschinen gestaltet hat, werden wir im zweiten Abschnitt dieses Buches besprechen.

Eine jede Veränderung in der Lage und Stärke eines galvanischen Stromes oder in der Lage und Stärke eines Magneten erzeugt in einem in der Nähe befindlichen Drahtkreise einen Induktionsstrom. Bisher hatten wir immer einigermaßen erhebliche Veränderungen der Lage oder Stärke angenommen. Diese Wirkung geht aber bis zu den allerkleinsten Veränderungen. Das wunderbarste und am genialsten ausgedachte Beispiel dieser induzierenden Wirkung ist das Bellsche Telephon. Die Wirkungsweise desselben wird aus der schematischen Fig. 211 klar hervorgehen. In dieser Figur sind zwei Stahlmagnete N S und $N_1 S_1$ an ihren Nordpolen N und N_1 mit einem Draht umwickelt, der die beiden Magnete miteinander verbindet. Vor jedem Nordpole

Fig. 211.

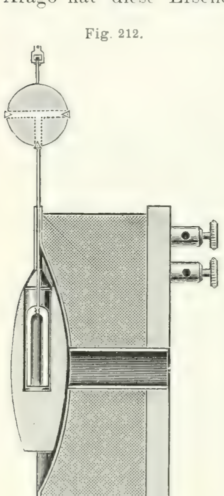


steht in der Nähe eine dünne Platte aus weichem Eisen. In diesen wird durch die Wirkung der Magnete je ein Südpol s und s′ auf der den Magneten zugewendeten Seite induziert. Drückt man nun die eine Eisenplatte, z. B. s, ein wenig mit der Hand ein, so wird der Südpol dadurch dem Magneten und der diesen umgebenden Spirale genähert. Infolgedessen entsteht in dieser Spirale ein Induktionsstrom, welcher sich durch den Draht zu dem anderen Nordpol N_1 fortpflanzt und diesen, da er umgekehrt wie der Zeiger einer Uhr um ihn fließt, verstärkt. Dadurch wird aber nun die Platte s′, infolge der stärkeren Wirkung des Nordpols N_1, ein wenig an N_1 angezogen. Im Moment also, wo man s ein wenig gegen N herandrückt, wird s′ ein wenig gegen N_1 herangezogen. Hätte man s ein wenig von N entfernt, so würde auch s′ sich sofort von N_1 entfernen. Einer jeden noch so kleinen Bewegung von s entspricht also eine ebensolche Bewegung von s′. Wenn man nun gegen die Platte s spricht, so wird diese dadurch in sehr kleine Bewegungen, in sehr kleine Schwingungen versetzt. Jede Schwingung erzeugt einen Induktionsstrom und daher dieselbe Schwingung an der Platte s′. Diese Schwingungen der Platte s′ teilen sich dann der Luft mit und so hört man in s′ das, was in s hineingesprochen wurde. Wir werden im zweiten Teile Gelegenheit haben, uns mit der spezielleren Einrichtung des Telephons und mit den an diesem Schema angebrachten Verbesserungen näher zu beschäftigen.

Ebenso wie in Drähten entstehen auch in ausgedehnten Metall-

massen Induktionsströme durch Bewegung von Magneten oder Strömen. Wenn man z. B. eine kupferne Scheibe, wie es Arago getan hat, rasch um ihre Achse dreht und über derselben eine Magnetnadel fest aufstellt, so werden durch diese Bewegung der Kupferscheibe bei den Magnetpolen vorbei in der Scheibe Induktionsströme erzeugt. Die Richtung der Ströme ist dabei nach dem Lenzschen Gesetz wieder die, daß diese durch ihre elektromagnetische Wirkung die Scheibe in der entgegengesetzten Richtung forttreiben würden. Entfernt sich also z. B. in einem Moment ein Punkt der Scheibe von dem Nordpol der Magnetnadel, so würde diese elektromagnetische Wirkung diesen Punkt dem Nordpol zu nähern suchen. Daraus folgt, daß, wenn die Magnetnadel nicht fest, sondern drehbar über der Scheibe aufgehängt ist, daß sie unter dem Einfluß dieser Kräfte der Rotation der Scheibe folgen muß. Der Nordpol der Nadel muß eben dem Punkt der Scheibe folgen, der sich von ihm entfernt, aber sich ihm nähern will. Arago hat diese Erscheinung zuerst beobachtet, aber erst durch Faradays Entdeckung der Induktionsströme wurde sie auf ihre Grundlage zurückgeführt.

Fig. 212.



Eine andere Folgerung dieser Erscheinung hat bei der Konstruktion von Galvanometern eine wichtige Anwendung gefunden. Wenn eine Magnetnadel in einem metallischen Gehäuse schwingt, so werden in diesem Metall ebenfalls Induktionsströme erregt, und durch die elektromagnetische Anziehung wirken diese der Bewegung der Magnetnadel entgegen. Die Magnetnadel hört infolgedessen bald auf zu schwingen, ihre Schwingungen werden rasch gedämpft. Man umgibt deshalb, wie wir S. 194 gesehen haben, bei vielen Galvanometern den Magneten mit einer solchen dämpfenden Kupferhülse und hat dadurch den Vorteil, daß die Nadel des Galvanometers sich rasch in ihre bestimmte Stelle begibt, ohne lange hin und her zu schwingen. Fig. 212 zeigt z. B. den Durchschnitt eines solchen Kupferdämpfers in dem oben (S. 193) abgebildeten Galvanometer von Hartmann & Braun. Man sieht einen glockenförmigen Magnet in dem Hohlraum einer Kupfermasse befindlich. Oben ist der Spiegel zu sehen, durch den die Bewegungen beobachtet werden, rechts ist der Durchschnitt der Multiplikatorwindungen gezeichnet.

Allgemein nennt man die Ströme, die durch Induktion in ausgedehnten Metallmassen entstehen, (mißbräuchlich) Foucaultsche Ströme, oder jetzt besser Wirbelströme. Diese Wirbelströme sind häufig störend, besonders bei der Konstruktion von elektrischen Maschinen, weil zu ihrer Erzeugung ein gewisser Aufwand von Arbeit gehört, der aber nutzlos verbraucht wird, und weil diese Ströme sich nach dem Jouleschen Gesetz in Wärme umwandeln und schädliche Erhitzungen hervorbringen. Man hat deshalb bei den technischen elektrischen Maschinen sich bemüht, diese Wirbel-

ströme zu verhindern oder wenigstens abzuschwächen. Dieselben entstehen dort gerade in denjenigen magnetischen Eisenmassen, welche die wirksamen induzierten Drähte tragen. Um diese Ströme zu verhindern, ist es notwendig, diese ausgedehnten Metallmassen in denjenigen Richtungen zu unterbrechen, in welchen die Wirbelströme fließen würden. Man macht deshalb Eisenkörper, in welchen Wirbelströme entstehen könnten, nicht aus einem massiven Stück, sondern setzt sie aus einer großen Reihe von einzelnen Eisenstücken zusammen, so daß in der Richtung der Wirbelströme keine zusammenhängende metallische Bahn vorhanden ist. Gewöhnlich nimmt man oxydierte Eisendrähte oder auch isolierte Eisenscheiben zur Konstruktion von solchen Metallmassen.

Die Induktionsströme, die durch Öffnen und Schließen eines primären Stromes entstehen, werden viel stärker, wenn man in die primäre Drahtspule einen Eisenkern hineinbringt und dann den Strom abwechselnd schließt und öffnet. Denn dann erhält man nicht nur die Induktionsströme von dem entstehenden und vergehenden Strom, sondern auch die Induktionsströme von dem entstehenden und vergehenden Magnetismus innerhalb der induzierenden Spule, und diese wirken zusammen, verstärken sich und machen daher die Induktionswirkungen viel kräftiger und stärker. Wenn man also in die primäre Spule einen Kern von weichem Eisen hineinbringt, so wird die induzierende Wirkung der primären Spule außerordentlich vergrößert. Nach dem über die Wirbelströme eben Gesagten nimmt man aber nicht einen massiven Eisenkern, sondern ein Bündel oxydierter Eisendrähte.

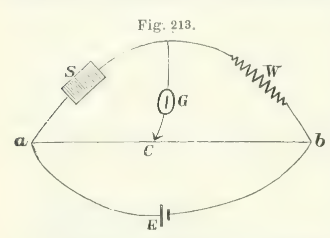
Mit den beiden bisher besprochenen Arten der Induktion, der Magnetoinduktion und Elektroinduktion, sind aber die Induktionserscheinungen noch nicht erschöpft. Es gibt noch eine dritte, besonders wichtige und interessante Art von Induktion, die ebenfalls von Faraday entdeckt wurde, die Selbstinduktion.

Ganz ebenso nämlich, wie ein galvanischer Strom bei seinem Entstehen und Verschwinden in einem in seiner Nähe befindlichen Drahtkreis Induktionsströme erzeugt, ganz ebenso erzeugt er auch in seiner eigenen Bahn derartige Ströme. Am einfachsten läßt sich diese Tatsache einsehen, wenn man einen spiralförmig gewundenen Draht nimmt und den Strom von einem galvanischen Element durch ihn hindurchsendet. Es fließt dann der Strom durch lauter parallel nebeneinander liegende Windungen. In dem Moment nun, wo der Strom unterbrochen wird, wird von jeder Windung auf die anderen Induktion ausgeübt; ebenso wird im Moment, wo der Strom geschlossen wird, auch in allen Windungen Induktion erregt. Man nennt diese Induktionsströme in der eigenen Bahn eines Stromes Extraströme. Beim Schließen eines Stromes fließt der erzeugte Extrastrom in entgegengesetzter Richtung durch die Spirale wie der ihn erzeugende primäre Strom. Der beim Schließen entstehende Extrastrom schwächt also den eigentlichen Strom. Daher kommt ein jeder Strom, wenn er geschlossen wird, nicht sofort zu seiner vollen Stärke, sondern erlangt diese erst allmählich, allerdings in sehr kurzer Zeit. Er kommt nämlich erst dann zu seiner vollen Intensität, wenn der Schließungsextrastrom abgelaufen ist, seine Intensität wächst allmählich von Null an bis zu ihrem vollen Werte. Beim Öffnen da-

gegen, wenn der Strom in einer Leitung unterbrochen wird, sucht der entstehende Öffnungsextrastrom in derselben Richtung zu fließen, wie der ursprüngliche Strom. Da der ursprüngliche Strom aber schon unterbrochen ist, so findet der Öffnungsstrom hier, in diesem einfachen Fall, keinen Weg mehr durch den Draht, ein eigentlicher Öffnungsextrastrom kommt also gar nicht zustande. Trotzdem aber ist eine Tendenz für den Öffnungsstrom, eine elektromotorische Kraft vorhanden, welche unter geeigneten Umständen auch wirklich den Strom zum Fließen bringen kann.

Es ist zuerst nicht leicht, sich von dem Vorhandensein dieser Extraströme, die durch Selbstinduktion entstehen, eine klare Vorstellung zu verschaffen. Am einfachsten kann man sie, wenigstens den Öffnungsextrastrom, experimentell auf folgende Weise erkennen. Man nimmt eine Spule mit vielen Windungen (in einer solchen werden die Extraströme, wie wir sehen werden, recht stark) und schaltet sie in einen Zweig einer Wheatstoneschen Drahtkombination ein, wie in Fig. 213. S sei diese Spule, E sei das galvanische Element, a b ein ausgespannter Draht, W der Vergleichswiderstand, G sei ein empfindliches ballistisches Galvanometer (S. 197) in der Brücke. Dann wissen wir, daß wir durch Verschieben des Kontaktes C auf der Brücke eine Stelle finden können, bei welcher das Galvanometer in der Brücke ganz stromlos ist. Die ganze Drahtkombination wird von Strömen durchflossen, nur die Brücke ist ohne Strom, und zwar ist die Stellung von C nur abhängig von dem Verhältnis der Widerstände der vier Seitenzweige S, W, a C, b C, gar nicht von der elektromotorischen Kraft des Elementes E. Man kann also kleine oder große elektromotorische Kräfte in E einschalten, ohne daß das Galvanometer einen Ausschlag macht, wenn es einmal auf Stromlosigkeit eingestellt ist. Wenn man nun aber, und das ist das Experiment, das den Extrastrom beweist, den Hauptstromkreis E a b öffnet, so sieht man die Nadel des Galvanometers einen plötzlichen Ausschlag machen und dann wieder in die Ruhelage zurückkehren. Dieser Nadelausschlag beweist, daß durch das Galvanometer ein momentaner Strom gegangen ist, und dieser rührt her von der Selbstinduktion in der Rolle S. Durch das Aufhören, Öffnen des primären Stromes in S ist eine elektromotorische Kraft der Selbstinduktion entstanden, welche durch S selbst und durch alle mit ihm verbundenen Leiter, also auch durch G, einen momentanen Strom sendet.

Fig. 213.



Wir können sogar, wenn wir dieses Experiment anstellen, noch mehr als bloß qualitativ das Vorhandensein des Öffnungsextrastromes erkennen, wir können auch, indem wir Spulen von verschiedener Größe und Form an die Stelle von S bringen, quantitativ bestimmen, wie die Größe der erzeugten elektromotorischen Kraft sich bei verschiedenen Spulen ändert. Tut man dies, so findet man zunächst, daß der Widerstand der Spule S nicht in Betracht kommt. Denn wenn man einen und denselben Draht

das eine Mal frei ausgespannt, das andere Mal zu einer Spirale gewickelt an die Stelle S bringt, so findet man unter sonst gleichen Umständen den Ausschlag des Galvanometers das zweite Mal bedeutend größer, hunderte und tausende Mal so groß wie im ersten Fall. Da der Widerstand des Drahtes in beiden Fällen derselbe ist, so sieht man, daß die Form des Drahtes eine wesentliche Rolle für die Größe des Extrastromes spielt. Verschiedene Rollen unterscheiden sich also dadurch, daß sie je nach ihrer Form, ob sie eng oder weit, lang oder kurz sind, viele oder wenige Windungen haben, unter sonst gleichen Umständen verschiedene Extraströme erzeugen.

Und das ist ohne weiteres einzusehen. Denn die elektromotorische Kraft der Extraströme hängt, wie die aller anderen Induktionsströme, ab von der Geschwindigkeit, mit der die Kraftlinienzahl in der betreffenden Fläche sich ändert. Je rascher, je plötzlicher also einerseits die primäre Intensität sich ändert, um so stärker ist die elektromotorische Kraft, die Spannung des Extrastromes. Bei gleicher Änderung der Stromstärke wird aber die elektromotorische Kraft um so größer, je mehr Windungen die induzierte Spule hat, weil durch jede Windungsebene die Kraftlinien hindurchgehen. Daraus folgt, daß das Verhältnis, in welchem die erzeugte elektromotorische Kraft des Extrastromes zu der Geschwindigkeit steht, mit der die Stromstärke sich in der Spule ändert, daß dieses Verhältnis allein abhängig von der Windungszahl und Größe, also von der Form der Spule ist. Man nennt dieses Verhältnis den Koeffizienten der Selbstinduktion oder das Selbstpotential, auch kurz bloß die Selbstinduktion der betreffenden Spule. Das Selbstpotential einer Spule ist eine Größe, die, ebenso wie der Widerstand eines Drahtes, von der Form, der Länge, dem Querschnitt, der Windungszahl der Spule, also nur von geometrischen Größen, gar nicht von der durch die Spule gehenden Stromstärke abhängt. Das Selbstpotential hängt aber, anders wie der Widerstand, nicht ab von dem Material des Drahtes. Für Kupfer-, Messing-, Aluminiumdrähte u. s. w. ist es unter sonst gleichen Umständen ganz dasselbe. Nur Eisendrähte machen wegen ihres stark magnetischen Charakters davon eine Ausnahme. Es besteht immer der Zusammenhang:

Elektromotorische Kraft des Extrastroms = Selbstpotential × Geschwindigkeit der Intensitätsänderung.

Man mißt das Selbstpotential von Drähten in einer bestimmten Einheit, welche man 1 Henry nennt. Wenn nämlich die Geschwindigkeit, mit der der Strom in einer Spule sich ändert, so groß ist, daß in jeder Sekunde sich die Stromstärke gerade um 1 Ampere ändert, so werden in Spulen verschiedener Form die dadurch entstehenden Extraströme verschiedene elektromotorische Kraft haben. Eine Spule nun, in welcher die dann entstehende elektromotorische Kraft gerade 1 Volt ist, soll nach dieser Festsetzung gerade die Einheit des Selbstpotentials, 1 Henry, haben. Daraus folgt, daß für die Einheiten dieselbe Gleichung gilt

$$1 \text{ Volt} = 1 \text{ Henry} \times \frac{1 \text{ Ampere}}{1 \text{ Sekunde}}.$$

Übrigens ist diese Einheit für die praktisch vorkommenden Fälle gewöhnlich zu groß und man nimmt deswegen den tausendsten Teil derselben als Einheit an und bezeichnet ihn als 1 *Millihenry*. Um einen ungefähren Begriff von der Größenordnung des Selbstpotentials von Spulen zu bekommen, kann folgende Angabe dienen. Ein Solenoid mit einer Drahtlage hat, wenn es 1 qcm Querschnitt und 1 m Länge besitzt und wenn auf ihm 1000 Drahtwindungen liegen, ein Selbstpotential von ungefähr 0,12 Millihenry; hat es 10 Drahtlagen von je 1000 Windungen, so ist das Selbstpotential auch ungefähr 10mal so groß.

Das Selbstpotential von Drahtrollen oder Drahtstücken ist also eine Größe, welche nur von der Form und Größe der Rolle abhängt. Man kann daher auch *Einheitsrollen* für das Selbstpotential herstellen, indem man Drahtrollen so abmißt, daß ihr Selbstpotential gerade 1 Henry oder 1 Millihenry u. s. w. ist. Bei der praktischen Herstellung solcher „*Normalen für die Selbstinduktion*“ muß man darauf achten, daß die Form der Drahtrolle unveränderlich bleibt — möglichst auch bei Temperaturänderungen —, weil diese Form den Wert des Selbstpotentials wesentlich beeinflußt. Man windet daher Drähte aus Metall oder besser Metalllitzen auf isolierende Steinrollen (Serpentin) auf und schließt sie in Stein ein. Eine solche Einheitsrolle für 0,1 Henry, wie sie von Siemens & Halske konstruiert wird, zeigt Fig. 214. Mit solchen Einheitsrollen, die von 1 Henry bis zu 0,1 Millihenry hergestellt werden, versehen, kann man leicht das Selbstpotential jeder Rolle experimentell bestimmen. Eine einfache, dafür geeignete Methode werden wir im Kapitel 10 (Wechselströme und Drehströme) beschreiben. Je größer das Selbstpotential eines Leiters ist, um so größere elektromotorische Kraft haben die Extraströme, die in ihm bei Stromänderungen entstehen, um so stärker gespannt sind sie; je geringer das Selbstpotential ist, um so geringer. Spiralen haben großes Selbstpotential, gerade ausgespannte Drähte sehr geringes.

Fig. 214.

Um daher die Extraströme in einem Draht, auch wenn er lang ist, möglichst schwach zu machen, muß man sein Selbstpotential möglichst klein machen. Bei einer Drahtspule kann man das dadurch bewirken, daß man den Draht *bifilar* wickelt, wie es Fig. 215 zeigt. Man biegt den Draht in der Mitte um und windet ihn nun so auf, daß die beiden Hälften immer nebeneinander liegen. Dann fließt offenbar der Strom in je zwei benachbarten Windungen immer nach der entgegengesetzten Richtung, und daher heben sich die Extraströme in den einzelnen Windungen gegenseitig auf. Eine solche Drahtrolle nennt man eine *induktionsfreie* oder *bifilar gewickelte* Drahtrolle. In den Widerstandskästen, die wir in Kapitel 4 besprochen haben, sind die Drahtrollen immer bifilar gewickelt.

Fig. 215.

Will man umgekehrt die Extraströme in einem Draht möglichst stark machen, so muß man sein Selbstpotential möglichst groß machen, auch

wenn er selbst nur einen kleinen Widerstand besitzt. Das kann man erreichen, wenn man diesen Draht um einen Kern aus weichem Eisen herumwindet. Dadurch werden nämlich, bei gleicher Änderung der Stromstärke, die Extraströme sehr stark, weil der Magnetismus des Eisens dabei mit verändert wird und dadurch auch wieder induzierend wirkt. Eine Rolle, die kleinen Widerstand, aber dadurch, daß sie eben einen Kern von weichem Eisen hat, große Selbstinduktion besitzt, bezeichnet man häufig als Drosselspule. Eine Drosselspule ist also nichts anderes als ein Elektromagnet mit geringem Widerstand der Umwindung. Solche Drosselspulen besitzen unter Umständen brauchbare Anwendungsfähigkeit, worauf wir in den folgenden Kapiteln zu sprechen kommen werden, wobei sich auch ihr Name erklären wird.

Die Extraströme spielen bei allen veränderlichen Strömen eine sehr wichtige Rolle, und wir werden in den beiden folgenden Kapiteln uns noch viel mit ihnen zu beschäftigen haben. Wir hatten das Gesetz gefunden, daß in einer Spule der Extrastrom eine um so höhere elektromotorische Kraft, um so höhere Spannung hat, je rascher die Intensität des primären Stromes sich ändert. Nun sieht man ohne weiteres, daß infolgedessen die Schließungs- und die Öffnungsextraströme sich nicht gleich verhalten können. Bei der Schließung eines Stromes wächst, wie oben erwähnt, die Stromstärke allmählich von Null an bis zu ihrem vollen Endwert. Die Änderung der Stromstärke ist also keine plötzliche, sondern eine allmähliche und daher hat der Schließungsextrastrom eine verhältnismäßig geringe Spannung. Anders ist es bei der Öffnung eines Stromes. Gerade im Moment vor der Öffnung hat der primäre Strom noch seine volle Stärke und gleich darauf ist die Stromstärke gleich Null geworden. Die Änderung der Stromstärke bei der Öffnung eines Stromes ist daher eine sehr rasche, plötzliche, und daher folgt, daß der Öffnungsextrastrom eine sehr hohe Spannung haben muß, eine viel höhere als der Schließungsextrastrom. Dies ist nun auch in der Tat der Fall. Der Öffnungsstrom ist so hoch gespannt, daß er die Luftschicht zwischen den beiden Leitern, durch deren Trennung der Strom geöffnet ist, in einem Funken durchbricht. Obwohl er also keinen geschlossenen Weg durch den Draht mehr findet, fließt er doch und zwar durch die Luftschicht zwischen den Unterbrechungsstellen. Öffnet man z. B. einen Strom dadurch, daß man einen Draht aus einem Quecksilbernapf herausnimmt, so wird der Öffnungsstrom so stark gespannt, daß ein heller Funke zwischen dem Quecksilber und dem Draht überspringt. Allgemein erhält man immer beim Öffnen eines nicht zu schwachen Stromes Funken, die man Öffnungsfunken nennt.

Eine weitere Folge dieser Verschiedenheit in dem Anwachsen und Abnehmen eines Stromes ist die, daß auch in einer von diesem Strom induzierten sekundären Spule die Öffnungsströme ebenfalls stärker gespannt sein werden, höhere elektromotorische Kraft haben müssen als die Schließungsströme. Die Schließung des primären Stromes geht eben allmählich vor sich, weil der Extrastrom entgegenfließt, während die Öffnung rasch und plötzlich vor sich geht. Daher ist allgemein die Spannung von Öffnungsströmen eine viel höhere als die von Schließungsströmen.

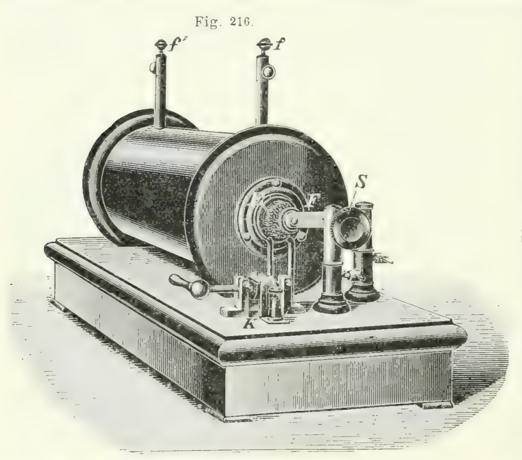
Nachdem wir so die Eigenschaften und Gesetze der Induktions-

ströme, seien sie nun durch Magneto-, Elektro- oder Selbstinduktion entstanden, kennen gelernt haben, wird es nicht schwer sein, eine genaue Kenntnis von Apparaten uns zu bilden, die eine große Bedeutung in der Wissenschaft und Technik haben, nämlich von den Induktionsapparaten oder Transformatoren.

Der kleine, für medizinische Zwecke konstruierte Apparat, den wir auf S. 211 Fig. 203 besprochen haben, ist bereits ein Induktionsapparat. Wenn wir über eine primäre Spule eine sekundäre bringen, so wird bei jeder Unterbrechung und Schließung des primären Stromes in jeder Windung der sekundären Spule eine elektromotorische Kraft erzeugt. Je größer also die Zahl der Windungen auf der sekundären Spule ist, um so größer wird die erzeugte Spannung des Induktionsstromes.

Durch Vergrößerung der Windungszahl der induzierten Spule kann man also die elektromotorische Kraft der Induktionsströme außerordentlich steigern, auf viele Zehntausende von Volt bringen, da eben jede Windung dann die Kraftlinien schneidet und dadurch induziert wird. Man kann so durch einen primären Strom mit geringer elektromotorischer Kraft, etwa 10 bis 20 Volt, leicht einen sekundären Strom mit sehr großer elektromotorischer Kraft, 100000 Volt und mehr, erzeugen. Die Apparate, welche dieses leisten, nennt man speziell Induktionsapparate.

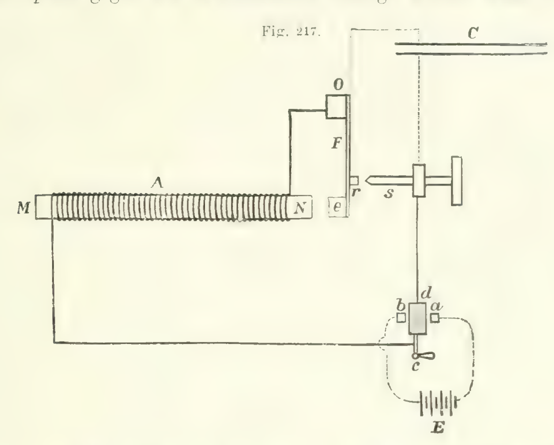
Fig. 216.



Ein solcher Induktionsapparat (von Ernecke, Berlin) ist in Fig. 216 gezeichnet. Das Schema desselben ist in Fig. 217 angegeben. Man sieht in diesem letzteren eine Drahtspule aus dickem Draht, A, die über einen Eisenkern M N gewickelt ist, welcher selbst aus einem Bündel Eisendrähte besteht. Dieses ist die primäre Spule. Um sie ist die äußere Spule, die nicht gezeichnet ist, isoliert herumgewickelt. Sie ist die induzierte Spule und besteht aus vielen Windungen eines dünnen Drahtes. In Fig. 216 sieht man nur den Eisenkern E, die beiden Spulen sind von einer Ebonithülle umgeben. Der primäre Strom geht (Fig. 217) von der Batterie E zunächst zu den Mittelklemmen a und b eines Kommutators, wie des in Fig. 63 gezeichneten, und von den Endklemmen c und d geht er zur primären Spule, aber durch einen Unterbrecher, einen Neefschen Hammer, hindurch. Dieser besteht hier einfach aus einer

Feder F, die an einem Fuß O befestigt ist und die ein Eisenstück e gerade dem Eisenkern N gegenüber trägt. Andererseits trägt sie ein Platinstück r, welches gegen die Spitze s, die verstellbar ist, sich anlegen oder von ihr sich fortbewegen kann. Liegen s und r aneinander an, so ist der Strom geschlossen, die Feder wird von dem Eisenkern angezogen, dadurch der Strom unterbrochen u. s. f. In Fig. 216 sieht man auch den Kommutator K und die Feder F des Unterbrechers, sowie die Schraube S, durch die die Spitze gegen das Kontaktstück bewegt werden kann. Die in-

Fig. 217.



duzierte Spule hat ihre Enden bei f und f' und der induzierte Strom fließt von dort in diejenige Leitung, in welcher man ihn benutzen will. Bei jeder Schließung und jeder Öffnung des primären Stromes durch den Hammer entsteht in der sekundären Spule ein Induktionsstoß; die Enden f und f' des sekundären Drahtes erhalten eine Spannungsdifferenz, bald in dem Sinne, daß f positive, f' negative Spannung, bald umgekehrt, daß f negative, f' positive Spannung hat. Je größer die Zahl der Windungen auf der sekundären Spule ist, um so größer ist die erzeugte Spannung der Induktionsströme und ebenso wird sie um so größer, je rascher, je plötzlicher der Strom im primären Leiter sich an Stärke ändert. Daß aus diesem Grunde die Öffnungsströme in der sekundären Spule viel stärker gespannt sind, als die Schließungsströme, wissen wir bereits. Daher kommt es, daß wenn man, etwa durch ein Elektrometer, die Spannungsdifferenz zwischen f und f' mißt, man immer findet, daß das eine Ende, z. B. f, dauernd eine größere Spannung hat als das andere, obwohl doch eigentlich die Spannung abwechselnd bald in dem einen, bald in dem anderen Sinne wirken sollte. Da die Öffnungsströme eben viel stärker gespannt sind, als die Schließungsströme, so mißt man dabei nur die ersteren.

Um aber bei solchen Induktionsapparaten mit derartigem Unterbrecher hohe Wirksamkeit zu erreichen, dazu gehört noch eine Einrichtung, die von F i z e a u angegeben wurde, und durch welche erst die Spannung

der Induktionsströme bedeutend vergrößert wird. Wirksam sind, wie gesagt, in der sekundären Spule hauptsächlich die Öffnungsströme, die also in dem Moment entstehen, wo sich in Fig. 217 r von s abhebt. Bei dieser Unterbrechung des primären Stromes entsteht aber in der primären Rolle der Öffnungsextrastrom, der zwischen r und s große Spannung hervorruft, so daß zwischen r und s der Öffnungsfunke erscheint. Dieser Funke beeinträchtigt aber die Wirkung des Induktionsapparates. Denn er bildet eine Verlängerung der Dauer des primären Stromes. Der primäre Strom geht nicht momentan auf Null zurück, sondern allmählich, er dauert an, bis der Funke abgelaufen ist. Könnte man den Funken beseitigen oder verkleinern, so würde die Wirkung des Apparates erhöht werden. Das hat nun Fizeau getan, indem er die beiden Leiter r und s, zwischen denen die Unterbrechung stattfindet, mit den beiden Belegungen eines Kondensators verband. Dieser ist in der Fig. 217 oben als C gezeichnet. Er besteht gewöhnlich aus paraffiniertem Papier, dessen Seiten mit Stanniol belegt sind. Mehrere Schichten solcher Kondensatoren sind übereinander gelagert und die Belegungen der einen Seite, sowie die der anderen sind miteinander verbunden. Die Elektrizitätsmengen, die an der Unterbrechungsstelle r und s durch den Extrastrom entstehen, verbreiten sich über diesen Kondensator, der eine große Kapazität besitzt, und dadurch wird die Spannungsdifferenz an der Unterbrechungsstelle und mit ihr der Öffnungsfunke kleiner. Der Kondensator befindet sich gewöhnlich in dem Kasten, auf dem der Induktionsapparat montiert ist.

Da die Induktionsapparate, wie wir sehen werden, auch zur Erzeugung von elektrischen Funken benutzt werden, werden sie häufig als Funkeninduktoren bezeichnet.

Die Spannung, die in der sekundären Spule solcher Induktionsapparate erzeugt wird, ist unter sonst gleichen Umständen um so größer, je mehr Windungen die sekundäre Spule hat. Durch Anwendung von sehr vielen Windungen kann man also mit den Induktionsapparaten sehr hohe Spannungen erzeugen. Wie wir aber in dem ersten Kapitel gesehen haben, muß Elektrizität von hoher Spannung sehr sorgfältig isoliert werden, damit sie nicht entweicht. Es ist deshalb bei den Apparaten dieser Art immer notwendig, die Drähte sorgfältig zu isolieren. Dies geschieht dadurch, daß man sie ganz in Paraffin einbettet, welches vorher sorgfältig erhitzt und von Luft befreit wird, und jede Drahtlage von der anderen durch gut paraffiniertes Papier oder durch Glimmer sorgfältig trennt.

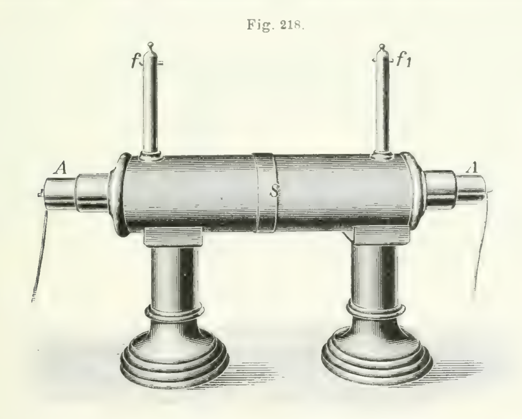
Alle diejenigen Erscheinungen, zu denen eine große Spannung der Elektrizität gehört, lassen sich durch Induktionsapparate in vorzüglicher Weise ausführen. Wir haben insbesondere schon mehrfach gesehen, daß Elektrizität von hoher Spannung imstande ist, den Widerstand leicht zu überwinden, welchen eine Luftschicht, die sich zwischen den Enden der Leitungsdrähte befindet, dem Strom entgegenstellt. Es bildet sich der elektrische Funke. Sobald bei den Induktionsapparaten der Unterbrecher im Gang ist, kommt induzierte Elektrizität von außerordentlich hoher Spannung an die beiden Enden der sekundären Spule. Verbindet man diese mit Drähten, die man einander nähern kann, so wird bei einem bestimmten Abstand derselben die Luft zwischen ihnen in einem glänzenden, klatschenden Funken durchbrochen. Je stärker die Spannung ist, um so

weiter können die beiden Leiter auseinander gebracht werden, ohne den Funkenübergang aufhören zu lassen. Es ist daher umgekehrt die Größe des Abstandes, in dem gerade noch Funken übergehen, die sogenannte Schlagweite, ein Maß und ein Kennzeichen für die Größe der erzeugten Spannung. Deswegen klassifiziert man die Induktionsapparate nach dieser Schlagweite und spricht von Apparaten mit 5, 10, 15 cm u. s. w. Schlagweite. Schlagweiten bis 30 cm lassen sich durch verhältnismäßig kleine und einfache Apparate erzeugen. Bei größeren Schlagweiten (man ist bis zu 1,20 m Länge bisher gekommen) macht die Herstellung genügender Isolation gegen die hohen Spannungen große Schwierigkeiten, doch werden so große Apparate jetzt von einigen Fabriken mit Sicherheit hergestellt. Als ungefährer Anhalt über den Zusammenhang zwischen der Zahl der sekundären Windungen eines Induktionsapparates und der erzeugten Schlagweite kann folgende Tabelle dienen, die sich auf ausgeführte Apparate bezieht und natürlich noch abhängig ist von der angewendeten primären Rolle, dem Unterbrecher und dem Kondensator. Es wurden erzeugt

Funken von der Länge . .	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100 cm
durch eine sekundäre Windungszahl von	9	18	26	35	42	50	59	68	76	86 Tausend.

Während man früher die Hauptteile eines Funkeninduktors, primäre und sekundäre Rolle, Unterbrecher, Kondensator, gewöhnlich zusammen

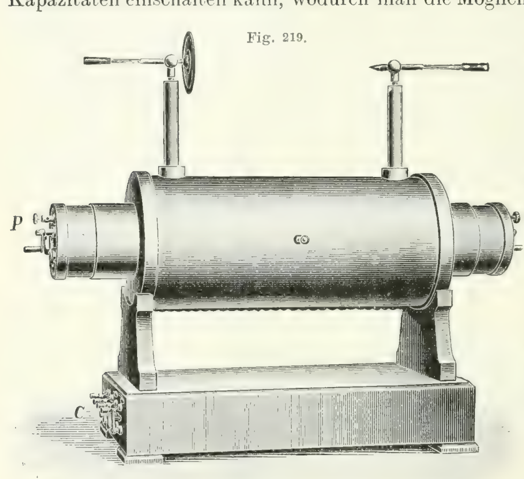
Fig. 218.



montierte, ist man jetzt zum Teil davon abgekommen. Man betrachtet die beiden Rollen mit dem Eisenkern als denjenigen Teil des Apparates, der für sich allein hauptsächlich die Transformation von Strömen bewirkt. Die Unterbrecher kann man in verschiedenfacher Weise konstruieren und jeden Funkeninduktor mit verschiedenen Unterbrechern arbeiten lassen. Auch den Kondensator trennt man jetzt zuweilen von dem eigentlichen Induktor, weil man für gewisse Unterbrecher, wie wir sehen werden, gar keines Kondensators bedarf. Ein Induktionsapparat ohne Unterbrecher und ohne Kondensator, wie er jetzt oft gebaut wird,

ist in Fig. 218 dargestellt. Man sieht nur die weit hervorragende primäre Wickelung A mit ihrem Eisenkern, und die sekundäre Rolle S mit den Klemmen f und f_1. An A werden die Zuleitungsdrähte des primären Stromes direkt befestigt. Die Anschlußklemmen müssen so weit abstehen, daß kein Funke von f oder f_1 auf sie überspringt. Vielfach und vorteilhaft werden die Induktorien jetzt so eingerichtet, daß man sowohl die primäre Wickelung wie auch den Kondensator in gewissen Stufen variabel macht. Man teilt nämlich die primäre Wickelung in drei oder mehr Abteilungen ein, so daß man durch einen Schalter entweder bloß $^1/_3$ oder $^2/_3$ aller primären Wickelungen vom Strom durchfließen lassen kann oder alle. Und ebenso teilt man den Kondensator in mehrere Abteilungen ein, so daß man durch einen Umschalter mehr oder minder große Kapazitäten einschalten kann, wodurch man die Möglichkeit hat, für jeden Zweck die beste Kombination anzuwenden. Die Veränderung der primären Wickelung, durch welche ihre Selbstinduktion verändert wird, ist bei den elektrolytischen Unterbrechern, die wir gleich besprechen werden, von Wichtigkeit. Einen solchen Induktionsapparat mit variabler Primärwickelung und variablem Kondensator von Klingelfuß in Basel, dessen Induktionsapparate ausgezeichnete Wirksamkeit haben, zeigt Fig. 219. Man sieht rechts und links an der primären Wickelung Klemmen mit einer drehbaren Kurbel, welche den Umschalter für die Primärwickelung darstellt und man sieht unten am Kasten ebenfalls einen Umschalter für die Kondensatoren. Die sekundären Pole sind mit verschiebbaren Metallstangen versehen, von denen einer in eine Spitze, der andere in eine Scheibe ausläuft. Diese dienen dazu, die Länge der sekundären Funken, also die Schlagweite zu messen.

Fig. 219.



Auf die Konstruktion der Unterbrecher hat man allmählich ganz besondere Sorgfalt verwendet und man hat sie in sehr verschiedener Art ausgeführt.

Der Hammerunterbrecher, welcher in Fig. 216 zu sehen und in Fig. 217 schematisch gezeichnet ist, ist der einfachste von diesen Unterbrechern und er ist namentlich bei kleineren Induktionsapparaten

immer angebracht. Die Zahl der Unterbrechungen bei ihnen hängt von der Länge der Feder ab; je kleiner diese ist, um so größer ist die Zahl der Unterbrechungen. Man erreicht dabei etwa 15 bis 20 Unterbrechungen pro Sekunde. Der Hammer läßt sich in der gezeichneten Form nur mit verhältnismäßig schwachen primären Strömen, solchen von höchstens 4 bis 5 Ampere, betreiben, weil sonst das Platin an der Unterbrechungsstelle zu rasch verbrennt und zu Störungen Anlaß gibt.

Allmählich aber hat sich die Notwendigkeit ergeben, größere Induktionsapparate auch mit viel stärkeren Strömen, solchen von 10, 20 und mehr Ampere zu betreiben und man mußte daher auch Unterbrecher für solche starke Ströme konstruieren, welche noch dazu eine erheblich größere Zahl von Unterbrechungen liefern sollen.

Eine Konstruktion des Unterbrechers, die dieses Problem tatsächlich sehr vollkommen löst, hat zuerst Boas (Allgemeine Elektrizitäts-Gesell-

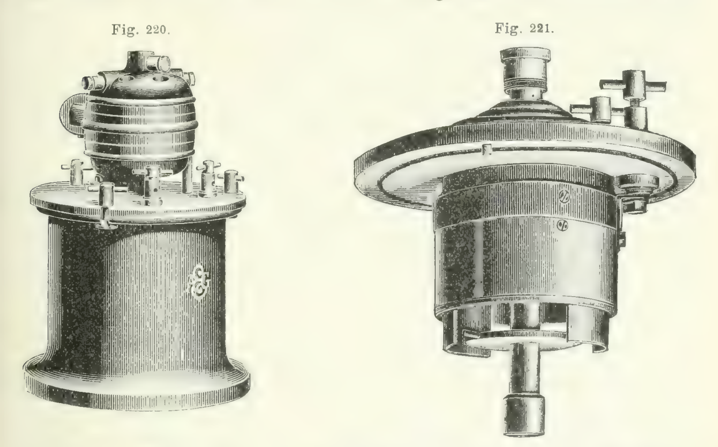


Fig. 220. Fig. 221.

schaft) ausgeführt. Man bezeichnet diesen Apparat, der in Fig. 220 in äußerer Ansicht dargestellt ist, als Turbinenunterbrecher. Der neue Gedanke ist dabei, daß erstens keine hin und her gehende Bewegung, sondern eine rotierende stattfindet, und daß zweitens nicht feste Teile rotieren, sondern daß man einen Quecksilberstrahl rotieren läßt. In dem unteren Gefäß in der Fig. 220 befindet sich am Boden Quecksilber, bedeckt mit Alkohol. Fig. 221 zeigt das Innere dieses Gefäßes. In das Quecksilber taucht ein Metallrohr ein, von dem aus eine seitliche Ausflußöffnung (an der runden Scheibe in der Figur sichtbar) einem Quecksilberstrahl den Austritt gewährt. Die runde Scheibe wird noch von dem Alkohol bedeckt. Das Rohr wird durch einen Elektromotor (oben in der Fig. 220) in rasche Rotation versetzt und saugt das Quecksilber durch die Zentrifugalkraft auf, so daß es aus der horizontalen Ausflußöffnung in einem kräftigen Strahl ausspritzt. Der Strahl trifft nun auf einen Metallring, der mit Aussparungen versehen ist, so daß er abwechselnd das Metall trifft oder

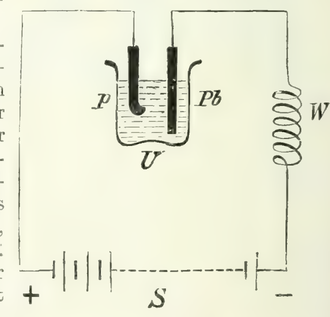
durch die Öffnung hindurchspritzt. Nun ist das Quecksilber mit dem einen Pol der Batterie verbunden, der Metallring mit der primären Spule des Induktionsapparates, und man sieht, daß man bei der Rotation des Quecksilbers abwechselnd Schließungen und Öffnungen des Stromes bekommt, die je nach der Geschwindigkeit der Drehung und der Zahl der Segmente des Metallringes zwischen 10 und 1000 in der Sekunde variieren können. Für gewöhnlich benutzt man den Unterbrecher mit einem Metallring, wie Fig. 222, bei welchem man 100 Unterbrechungen in der Sekunde erzielt. Der Turbinenunterbrecher, also auch die mit diesem verbundene primäre Spule, werden mit einer Spannung von zirka 110 Volt betrieben. Dadurch erhält die primäre Spule sehr hohe Stromstärken und infolgedessen treten sehr große Energiemengen auch in der sekundären Spule auf.

Fig. 222.



Neuerdings wird dasselbe Prinzip, aber umgekehrt, vielfach angewendet, z. B. bei dem Rotax-Unterbrecher. Bei diesem rotiert eine Quecksilbermasse in einem birnenförmigen Gefäß, bildet also wegen der Zentrifugalkraft einen Ring in dem ausgebauchten Teile des Gefäßes. Ein exzentrisch angeordnetes Rad, das sich um eine vertikale Achse drehen kann, und das aus isolierendem Material besteht, aber an einer Stelle des Randes einen Kupferkontakt besitzt, taucht in das rotierende Quecksilber ein und wird durch dieses selbst gedreht. Sobald nun der Kupferkontakt in das Quecksilber taucht, geht der Strom hindurch, sowie er aus dem Quecksilber heraustritt, ist der Strom unterbrochen. Der Apparat wird durch einen kleinen Elektromotor betrieben und kann bis 150 Unterbrechungen in der Sekunde machen.

Fig. 223.

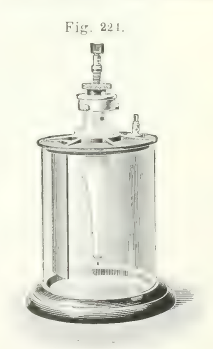


Dasselbe, was diese sorgfältig konstruierten mechanischen Apparate leisten, dasselbe und mehr leistet ein Unterbrecher ganz anderer Art, der von Wehnelt erfunden wurde, der „elektrolytische Unterbrecher“, auch kurz „Wehnelt“ genannt, welcher für viele Zwecke das Einfachste und Bequemste darstellt, was in diesem Gebiet bisher existiert.

In ein Gefäß mit verdünnter Schwefelsäure, wie U in Fig. 223, taucht man zwei Elektroden ein, von denen die eine eine große Platte Pb, etwa aus Blei ist, während die andere aus einer Platinspitze p besteht, die durch ein Porzellanrohr hindurch in die Flüssigkeit geführt wird. Verbindet man diese Elektroden mit den Polen einer großen Batterie S (etwa von 100 Volt Spannung) so, daß die Spitze Anode wird, und schaltet man ferner noch in diesen Kreis eine Drahtrolle W, etwa die primäre Rolle eines Induktionsapparates ein, so sieht man erstens an der Spitze eine helle Leuchterscheinung und hört zweitens einen lauten

Ton. Der Ton beweist, daß hier periodische Vorgänge vorhanden sind. Die helle Leuchterscheinung kommt von dem Glühen der Gase, welche sich an den Elektroden in großer Menge entwickeln. An der Spitze p entwickelt sich Sauerstoff. In der Tat finden in dieser Zelle sehr rasche Unterbrechungen und Schließungen des Stromes statt, so daß sie einen ganz selbsttätigen Unterbrecher darstellt. Die Ursache dieser Unterbrechungen ist nicht sofort einzusehen, sie ist auch keine einfache. Durch den Strom, der infolge der Selbstinduktion der Rolle W allmählich ansteigt, wird zuerst an p Sauerstoff entwickelt, ferner aber wird, weil der Querschnitt der Strombahn an der Spitze am geringsten ist, dort die größte Joulesche Wärme entwickelt, so daß sich die an der Spitze anliegenden Flüssigkeitsteilchen in Dampf verwandeln. Der Sauerstoff und dieser Dampf werden durch die Hitze selbst glühend, der Strom geht durch die Gashülle hindurch von der Spitze in die Flüssigkeit. Bald aber zerlegt sich, durch die große Hitze, der Wasserdampf in Sauerstoff und Wasserstoff; diese Gase nehmen ein größeres Volumen ein, so daß die Gasschicht zwischen Spitze und Flüssigkeit so groß wird, daß der Strom nicht mehr hindurchgehen kann. Der Strom ist unterbrochen, wobei durch die Selbstinduktion ein starker Öffnungsfunke entsteht. Die Gasblasen steigen nun sofort in die Höhe, dadurch kommt die Flüssigkeit wieder in Berührung mit der Spitze und der Strom fängt wieder an zu fließen und so geht der Prozeß weiter. Das langsame Ansteigen des Stromes durch die Selbstinduktion der Rolle ist bei diesem Vorgang wichtig. Je nach der Selbstinduktion, der Größe der Spannung der Batterie und der Größe der Spitze erhält man auf diese Weise Unterbrechungen, deren Zahl zwischen 200 und 2000 in der Sekunde variiert, also enorm groß ist. *Bei kleiner Selbstinduktion ist die Unterbrechungszahl groß, bei großer ist sie klein.* Dieser Unterbrecher ist von Siemens & Halske in eine Form gebracht worden, die in Fig. 224 gezeichnet ist. Auf der linken Seite der Flüssigkeitszelle sieht man als negative Elektrode eine Bleiplatte, in der Mitte ist an dem Deckel ein Porzellanrohr befestigt, durch welches die in eine Platinspitze auslaufende positive Elektrode hindurch geht. Durch die Schraube oben kann sie weiter oder weniger weit aus dem Rohr hinaus geschraubt werden. Um die Erhitzung des Apparates zu verringern, nimmt man große Gefäße mit großen Flüssigkeitsmengen. Da bei dem Wehnelt es gerade der Öffnungsstrom ist, welcher die Unterbrechung bewirkt, so darf man bei ihm den Induktionsapparat nicht mit Kondensator benutzen, weil ja der Kondensator gerade die Spannung des Öffnungsstromes verringern soll. Funkeninduktoren, die nur mit dem Wehnelt arbeiten sollen, versieht man deswegen überhaupt nicht mit einem Kondensator. Bei denjenigen, welche ihn besitzen, schließt man den Kondensator kurz.

Fig. 224.



Da die Unterbrechungszahl des Wehnelt von der Größe der Selbstinduktion abhängt, welche mit ihm zusammen im Stromkreis sich be-

findet, so teilt man jetzt, wie oben (S. 234) erwähnt, häufig die primäre Rolle des Induktors in mehrere Abteilungen ein, so daß man mehr oder weniger Windungen der primären Rolle vom Strom durchfließen lassen kann, also auch mehr oder weniger Selbstinduktion im Stromkreis hat. Bei kleiner Selbstinduktion liefert dann der Wehnelt die raschesten Unterbrechungen, bei großer die langsamsten.

Das Charakteristische am Wehneltunterbrecher besteht darin, daß der Strom, der im übrigen die ganze Flüssigkeitsmasse zu seiner Ausbreitung zur Verfügung hat, an der Spitze gezwungen ist, sich auf einen sehr kleinen Querschnitt zusammenzuziehen. Infolgedessen tritt an der Spitze die große Joulesche Wärmemenge auf, welche nun die Flüssigkeit verdampft und dadurch den Strom unterbricht, wie es oben beschrieben wurde.

Wenn aber diese plötzliche Verengerung der Strombahn in einem Elektrolyten die Hauptursache für den Effekt ist, so läßt sich, wie Simon zeigte, der Unterbrecher noch in anderer Form, ohne Platinspitze konstruieren. Man bringt, wie Fig. 225 zeigt, in das Gefäß mit Schwefelsäure und Bleiplatte ein Porzellanrohr hinein, welches an seinem Boden ein oder mehrere sehr feine Löcher von etwa 1 qmm Querschnitt hat. In dem Rohr befindet sich ebenfalls die Schwefelsäure und von oben taucht in dasselbe eine Elektrode, z. B. eine Bleielektrode. Dann muß der Strom, um von der einen Elektrode zu der anderen zu gelangen, durch die Flüssigkeit in den engen Löchern gehen und an diesen Stellen entwickelt sich auch wieder, weil der Querschnitt sehr klein, also der Widerstand sehr groß ist, eine große Wärmemenge, welche nun dieselben periodischen Wirkungen hervorbringt wie an der Platinspitze des Wehneltunterbrechers.

Fig. 225.

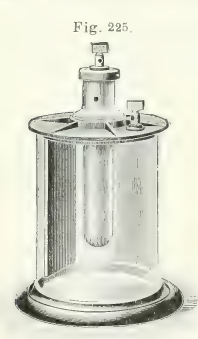
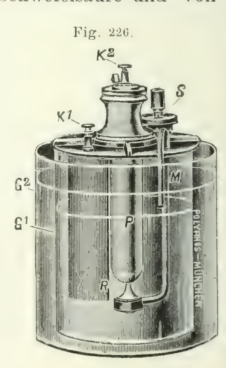


Fig. 226.

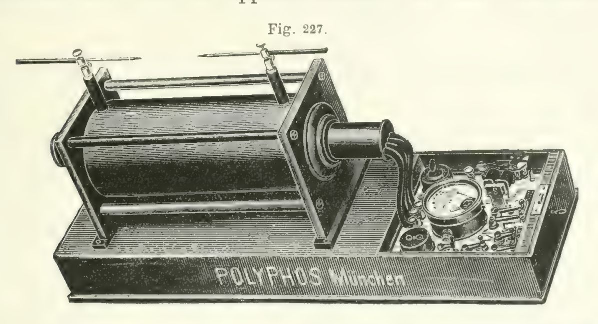


Der Simonunterbrecher wird von der Polyphos-E.-G.-München mit regulierbarer Lochgröße konstruiert, wie Fig. 226 zeigt, indem ein Porzellankonus R von unten mehr oder weniger weit in das Loch durch eine Schraube S hineingeschoben wird. Dieser Unterbrecher hat fast dieselben Vorzüge wie der Wehneltsche.

Will man einen dieser Unterbrecher zum Betrieb eines Funkeninduktors, an dem ein gewöhnlicher Hammerunterbrecher angebracht ist, benutzen, so muß man diesen kurzschließen, d. h. die beiden gewöhnlich getrennten Stücke desselben direkt oder durch einen dicken Draht verbinden. Dadurch ist dann auch der Kondensator kurz geschlossen. In Fig. 227 ist ein Funkeninduktor abgebildet, wie er für viele physikalische Zwecke geeignet von der Polyphos-E.-G. in München

gebaut wird. Derselbe besitzt einen Hammerunterbrecher, der einen Strom von 10 Ampere verträgt, er besitzt einen Umschalter, um die Primärwickelungen in drei Stufen einzuschalten und einen Umschalter, um den Kondensator in drei Stufen zuzuschalten. Durch einen weiteren Umschalter kann man den Apparat entweder mit dem Hammerunter-

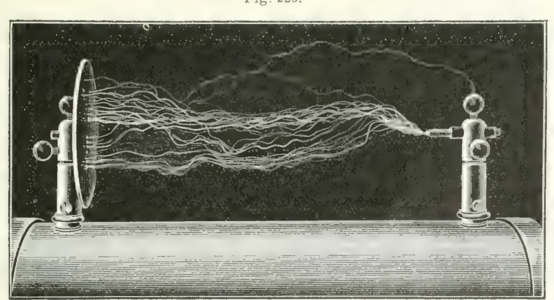
Fig. 227.



brecher betreiben oder mit einem Wehnelt oder einem anderen Unterbrecher.

Wenn man Induktionsapparate mit dem Turbinen- oder dem Wehneltunterbrecher betreibt, so werden die Funkenerscheinungen sehr glänzend. Da man nämlich dann gewöhnlich einen Strom von 100—120 Volt Spannung in die primäre Spule hineinsendet, während man bei den Hammerunterbrechern höchstens 16—20 Volt anwendet, so ist die Energiemenge,

Fig. 228.



die in den primären Kreis hineingegeben wird, und daher auch die Energiemenge, die man im sekundären Kreis erhält, eine sehr große. Das heißt aber, bei gleicher Spannung in der sekundären Rolle ist die Stromstärke, die man erhält, eine viel größere. Man kann jetzt bei Induktionsapparaten von der sekundären Spule Stromstärken bis zu 0,1 Ampere bekommen, was bei 50 000 bis 100 000 Volt Spannung schon eine erhebliche Leistung ist und einem Effekt von 5 bis 10 Kilowatt

(6,8—13,6 Pferdekräfte S. 115) entspricht. Infolgedessen bekommt man zwischen Spitze und Platte nicht bloß einen glänzenden Funken, sondern man bekommt ein glänzendes Funkenbüschel, einen ganzen Lichtstrom, der auch mit einem sehr lauten Getöse verbunden ist. In Fig. 228 ist eine Abbildung dieser Erscheinung gegeben, wie sie schon ein Induktionsapparat von 40 cm Schlagweite ergibt, wenn er mit einem dieser neuen Unterbrecher betrieben wird.

Es ist übrigens nicht notwendig, den primären Strom immer durch einen Unterbrecher öffnen und schließen zu lassen, um Induktionsströme zu erhalten. Das ist nur eine von den Möglichkeiten, wie man Induktionsströme in der sekundären Spule erzeugen kann. Eine andere, vielfach benutzte Methode besteht darin, daß man Wechselströme durch die primäre Spule hindurchsendet, die man etwa in einer Wechselstrommaschine erzeugt hat. Läßt man solche Wechselströme durch die primäre Spule hindurchgehen, so ändert sich ja in dieser fortwährend die Richtung und Stärke des Stromes und daher müssen auch in einer die primäre umgebenden sekundären Spule fortwährend Induktionsströme entstehen, da jede Veränderung in dem primären Strom einen Induktionsstrom erzeugt. Um dabei hohe sekundäre Spannungen zu erhalten, muß man natürlich Wechselströme mit sehr vielen Wechseln pro Sekunde anwenden.

Die elektromotorische Kraft, die Spannung der Induktionsströme ist, wie wir sahen, um so größer, je größer die Zahl der sekundären Windungen und je größer die primäre Stromstärke ist. Dies benutzt man in den Induktionsapparaten, um aus einem primären Strom von geringer Spannung (einigen Volt), aber verhältnismäßig großer Stärke, umgekehrt durch Induktion Ströme von sehr hoher Spannung aber geringer Intensität zu erzeugen. Man kann aber auch umgekehrt durch Induktion die Stromstärke im sekundären Strom größer und die Spannung im sekundären Strom geringer machen als im primären. Wenn man nämlich die sekundäre Spule aus wenigen, dicken Windungen macht und dagegen die primäre Spule aus vielen Windungen bestehen läßt und durch sie Wechselströme von hoher elektromotorischer Kraft, aber dabei geringer Intensität hindurchsendet, so ist klar, daß in der sekundären Rolle die Verhältnisse gerade die entgegengesetzten werden. Es wird nämlich die induzierte elektromotorische Kraft verhältnismäßig klein, weil sehr wenig sekundäre Windungen vorhanden sind und weil die primäre Stromstärke gering ist. Dagegen kann der sekundäre Strom stark werden, weil der innere Widerstand sehr gering ist, indem er eben nur aus einigen Windungen dicken Drahtes besteht. Praktische Verwendung hat diese Umwandlung erfahren in den Transformatoren, von welchen im zweiten Teil, Kapitel 4, die Rede sein wird.

Man sieht also, daß man durch Induktion die elektrische Energie eines Stromes in andere Form bringen, verwandeln kann, ohne natürlich ihre Menge vergrößern zu können.

---

10. Kapitel.

Die Wechselströme und Drehströme.

Die galvanischen Säulen und die Thermosäulen liefern, wenn sie durch den äußeren Stromkreis geschlossen werden, galvanische Ströme, welche dauernd dieselbe Richtung haben. Stets fließt im Stromkreis, z. B. eines Daniellschen Elements, der positive Strom vom Kupferpol durch den äußeren Stromkreis zum Zinkpol. Solche Ströme nennt man deshalb gleichgerichtete Ströme, oder kurz Gleichströme, und sie waren es lange Zeit allein, welche beachtet und genau studiert wurden. Ihr Grundgesetz ist das Ohmsche Gesetz.

Dagegen haben wir bei der Behandlung der Induktionserscheinungen zum erstenmal das Auftreten von Strömen anderer Art in einem Stromkreis kennen gelernt, von Strömen, deren Richtung rasch hintereinander wechselt und welche man deshalb Wechselströme nennt. Die eigentümlichen Erscheinungen und Gesetze dieser Ströme wurden erst spät Gegenstand der allgemeineren Untersuchung. Dabei aber hat sich gezeigt, daß die Wechselströme uns viel mannigfaltigere Erscheinungen bieten als die Gleichströme, so daß sie vom wissenschaftlichen Standpunkt interessanter und vom praktischen Standpunkt mindestens ebenso wichtig sind, wie die Gleichströme, und wir wollen daher ihre Eigenschaften im Zusammenhang besprechen.

Wechselströme werden durch abwechselnde Induktionswirkungen leicht erzeugt, z. B. durch Schließen und Öffnen eines primären Stromes, oder bei der Magnetinduktion durch Annähern eines Magneten an einen Stromkreis und durch Entfernen desselben. In dem Stromkreis, etwa in einer Induktionsrolle und deren äußerem Schließungskreis, entsteht dann immer abwechselnd ein Strom in der einen Richtung, und darauf ein Strom in der entgegengesetzten Richtung.

Um in die Verhältnisse einen näheren Einblick zu gewinnen, nehmen wir an, daß wir unsere kleine Maschine (Fig. 210) haben, die schon auf S. 222 beschrieben wurde und in welcher durch gleichmäßige Drehung der Drahtrollen R und R′ vor den Polen des Magneten Induktionsströme von abwechselnder Richtung erzeugt werden.

Wir denken uns die beiden Enden der Drahtrollen zunächst offen, nicht durch den äußeren Stromkreis W geschlossen. Drehen wir die Rollen, so werden die Enden a und b eine Spannungsdifferenz bekommen, die mit dem Beginn der Drehung anfangen wird zu wachsen, die bis zu einem Maximalwert zunehmen und dann wieder abnehmen wird. Wenn die Rollen vor den Polen des Magneten gerade vorbeigehen, wird kein Strom induziert. Dann ist die Spannungsdifferenz Null. Drehen sich die Rollen weiter, so wird die Spannungsdifferenz zunächst wachsen, positive Werte bekommen (d. h. die Spannung von a wird größer sein als die von b), diese

werden bis zu einem Maximum ansteigen, dann wieder abnehmen, bis die Rollen sich um 180° gedreht haben. Dann ist die Spannungsdifferenz von a und b wieder Null und bei weiterer Drehung wird sie nun negative Werte bekommen, das vorher positive Ende des Drahtes wird nun negativ sein (a wird eine kleinere Spannung haben als b) und diese negative Spannungsdifferenz wird nun auch wieder bis zu einem Maximalwerte wachsen, dann abnehmen, durch Null hindurchgehen und dann wird die Spannungsdifferenz wieder positiv werden.

Wir können diesen Verlauf der Spannungsdifferenz der offenen Rollen d. h. der elektromotorischen Kraft leicht durch eine Zeichnung darstellen. In Fig. 229 sind die Werte der elektromotorischen Kraft durch Linien dargestellt, die senkrecht auf die Linie a g gezeichnet sind. Im Punkt a ist die elektromotorische Kraft gleich Null. Der Punkt a entspricht also der Stellung der Rollen, bei denen sie gerade über den Magnetpolen sich befinden. Die elektromotorische Kraft wächst dann nach der einen Rich-

Fig. 229.

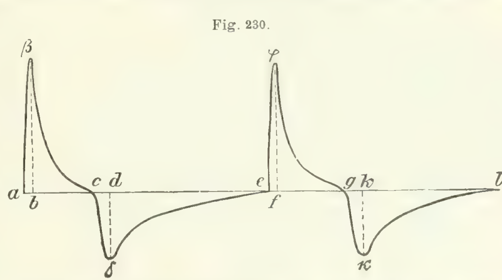
tung bis zum Punkt b, wo sie am größten ist (b β), wo also die Rollen in einer Richtung sich um 90° gedreht haben. Sie nimmt dann ab bis zum Punkt c, wo sie Null wird. Dort haben sich die Rollen um 180° von der Anfangslage aus bewegt. Dann kehrt die elektromotorische Kraft ihre Richtung um, was durch die nach unten gezogenen Linien angedeutet ist. Sie wächst in dieser Richtung bis d, und nimmt dann wieder ab bis e. Am letzteren Punkte sind die Rollen nach einer Drehung von 360° gerade wieder in ihre ursprüngliche Lage gekommen, sie haben eine vollständige Umdrehung gemacht und nun wiederholt sich derselbe Vorgang von neuem. Man nennt die Zeit, in welcher eine solche vollständige Umdrehung gemacht wird, die Periode der Drehung. Und wir sehen, die elektromotorische Kraft des Wechselstromes hat dieselbe Periode, wie die Drehung des Rollenpaares. Nach einer vollständigen Umdrehung (z. B. in $^1/_{50}$ Sekunde) durchläuft die elektromotorische Kraft wieder genau dieselben Werte. Man bezeichnet ferner die Winkel, um welche die Rollen sich von der Anfangslage a aus, wo die Spannung Null ist, gedreht haben, als die Phasen der Bewegung. Bei der Phase 0 ist also die Spannung 0, bei der Phase 90° am größten u. s. w.

Wir wollen nun die Enden unserer Rollen durch einen äußeren Leiter verbinden, von dem wir zunächst annehmen wollen, daß er kein erhebliches Selbstpotential (S. 227) besitzt, also etwa eine bifilar gewundene Rolle oder ein einfacher Draht ist. Durch diesen Leiter fließen nun Wechselströme hindurch, d. h. Ströme, deren Intensität und Richtung sich ebenfalls periodisch ändert, und zwar wird die Stromstärke ebenfalls durch

eine solche Wellenkurve angegeben sein, wie in Fig. 229. Die Stromstärke wird also in a gleich Null sein, sie wird bis zu einem Maximum wachsen, dann wieder abnehmen bis Null; dann wird der Strom seine Richtung ändern, die Stromstärke in dieser Richtung wird wieder bis zu einem Maximum wachsen, dann abnehmen bis Null u. s. w.

Man erhält also auch periodische Veränderungen der Stromstärke in dem Schließungskreis. Dabei ist es aber gar nicht nötig, daß die elektromotorische Kraft und die Stromstärke so regelmäßig ab- und zunehmen, wie es in unserer Figur gezeichnet ist und wie es bei der beschriebenen Anordnung tatsächlich der Fall ist. Nehmen wir z. B. an, wir erzeugen in einer Rolle Wechselströme dadurch, daß wir einen in der Nähe befindlichen primären Strom durch einen Neefschen Hammer abwechselnd öffnen und schließen. Wir sahen (S. 229), daß der Öffnungsinduktionsstrom viel plötzlicher ansteigt und viel höhere elektromotorische Kraft hat, als der Schließungsstrom. Wenn daher der Neefsche Hammer arbeitet, so wird der Verlauf der elektromotorischen Kraft und daher auch des Stromes in unserem sekundären Kreis etwa so sein, wie es Fig. 230 angibt. Im Moment

Fig. 230.

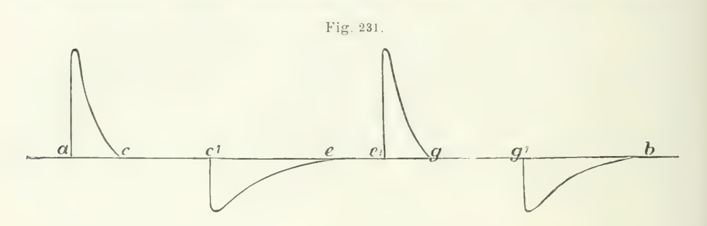


des Öffnens bei a steigt die elektromotorische Kraft rasch an bis β und fällt sofort wieder bis Null; beim Schließen steigt die elektromotorische Kraft im umgekehrten Sinne langsamer und weniger hoch bis δ und fällt wieder bis Null u. s. w. Auch hier bekommt man periodische Ströme insofern, als nach jeder Öffnung und Schließung der Verlauf sich wiederholt, aber man bekommt keine einfach periodischen Wechselströme. Ja, der Verlauf der induzierten Ströme in einer solchen Rolle ist sogar noch komplizierter. Wenn nämlich der Neefsche Hammer arbeitet, so macht er etwa 10 bis 30 Stromschließungen und Stromöffnungen in der Sekunde. Die Periode dieser Wechsel ist also $^1/_{10}$ bis $^1/_{30}$ Sekunde. Innerhalb dieser Periode entsteht zuerst ein Öffnungsstrom, der stark ansteigt und rasch abfällt und der vielleicht im ganzen $^1/_{10\,000}$ Sekunde dauert. Dann ist eine ganze Zeit der Stromkreis stromlos, bis nach etwa $^1/_{15}$ Sekunde der Strom durch den Hammer geschlossen wird und nun der Schließungsstrom in der sekundären Spule weniger steil verläuft. Auch dieser dauert aber nur sehr kurze Zeit, etwa $^1/_{10\,000}$ Sekunde, und dann ist die Spule wieder stromlos, bis zur nächsten Öffnung. Der Verlauf der elektromotorischen Kraft wird also in Wirklichkeit durch eine Zeichnung wie in Fig. 231 dargestellt. Der Periode entspricht die Strecke a bis e_1. In dieser Periode sind aber nur zwei kurz verlaufende Ströme vorhanden, zwischendrin ist gar kein Strom und keine Spannung vorhanden. Für die folgenden Betrachtungen machen diese Verschiedenheiten wenig aus

und wir wollen daher den einfacheren Fall der einfach periodischen Wechselströme betrachten, welche durch Fig. 229 dargestellt sind.

Zunächst entsteht die Frage: was versteht man unter der Stromstärke eines Wechselstromes und wie kann man dieselbe messen? Die Stromstärke wächst ja periodisch von Null an bis zu einem Maximum

Fig. 231.



und nimmt dann wieder ab, sie hat also bei einem Wechselstrom in jedem Moment einen anderen Wert. Man ist nun übereingekommen, unter der Stromstärke eines Wechselstromes eine mittlere Stromstärke während der Dauer einer Periode zu verstehen, also nicht das Maximum der eigentlichen Stromstärke (die Linien b β resp. d δ in Fig. 229), noch den kleinsten Wert derselben — nämlich Null —, sondern einen bestimmten mittleren Wert aus allen Einzelwerten der Stromstärke. Man bezeichnet diese auch als effektive Stromstärke. Da der Effekt eines Stromes immer von dem Quadrat der Stromstärke abhängt, so nimmt man den sogenannten quadratischen Mittelwert, d. h. die Wurzel aus der Summe der Quadrate der einzelnen Stromstärken. Wenn man von Stromstärke eines Wechselstromes spricht, so versteht man darunter immer die effektive.

Wie kann man nun die Stromstärke eines Wechselstromes messen, in Ampere ausdrücken? Jedenfalls nicht durch ein Voltameter, denn ein solches reagiert nur auf Gleichströme; ebensowenig durch ein Galvanometer, denn die Magnetnadel würde durch die beiden aufeinanderfolgenden entgegengesetzten Ströme auch entgegengesetzt abgelenkt werden, also in Ruhe bleiben. Man kann also nur entweder die Wärmewirkungen (die Joulesche Wärme) oder die elektrodynamischen Wirkungen der Ströme zum Messen von Wechselströmen benutzen; denn die ersten sind ganz unabhängig von der Richtung des Stromes und die zweiten lassen sich auch so anwenden, daß die Stromrichtung ohne Belang ist.

Beide Methoden sind angewendet worden, wir wollen aber hier nur die zweite besprechen, die Messung von Wechselströmen durch Elektrodynamometer. Bei den Elektrodynamometern (S. 205) ist immer eine feste und eine bewegliche, vom Strom durchflossene Rolle vorhanden, von denen die letztere von der ersten abgelenkt wird mit einer Kraft, die von dem Produkt der Stromstärken in beiden Rollen abhängt. Sind also beide Rollen von demselben Strom durchflossen, so hängt die Ablenkung von dem Quadrat der Stromstärke ab und ändert ihre Richtung nicht, wenn der Strom sich in beiden Rollen zugleich umkehrt, also

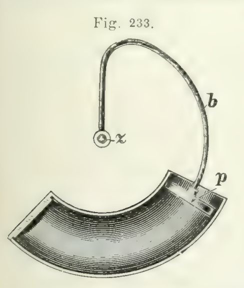
auch nicht, wenn die Rollen von Wechselströmen durchflossen werden. Die Ablenkung ist dabei direkt ein Maß für das Quadrat der effektiven Stromstärke der Wechselströme. Ist daher das Elektrodynamometer geeicht, ist sein Reduktionsfaktor bestimmt, so kann man aus seinen Angaben die Stromstärke eines Wechselstroms direkt in Ampere finden.

Ein solches Elektrodynamometer für schwache Ströme, welches zu rein wissenschaftlichen Messungen gebraucht wird, mit Spiegelablesung, haben wir oben (S. 205) beschrieben. Für die Messung stärkerer Wechselströme konstruiert man Apparate mit Zeigerablesung, bei welchen man, ohne weitere Manipulationen, die Stromstärke nach Einschaltung des Instrumentes sofort an einer Skala ablesen kann. Siemens & Halske, die seit ihrer Gründung durch Werner Siemens ebenso die Bedürfnisse der Technik wie die der Wissenschaft und Meßkunde pflegen, haben zuerst einen Apparat in Verkehr gebracht, den sie Präzisionsamperemeter für Gleichstrom und Wechselstrom nennen. Nach ihrem Vorgang werden ähnliche Wechselstromapparate jetzt auch von anderen Firmen konstruiert. Die Instrumente sind Elektrodynamometer, d. h. sie besitzen eine feste und eine bewegliche Drahtrolle. Eine äußere Ansicht eines solchen Amperemeters gibt Fig. 232. Im Innern desselben befindet sich eine feste Drahtrolle und eine bewegliche. Der beweglichen wird der Strom durch dünne Federn zugeführt. Damit nun der Zeiger, der mit der beweglichen Spule verbunden ist und der über der am Apparat oben sichtbaren Skala sich bewegt, ohne Schwingungen sich sofort auf die richtige Stelle begibt, ist die bewegliche Spule mit einer künstlichen Luftdämpfung versehen. Zu dem Zweck ist (Fig. 233) eine gebogene Röhre angebracht, in welcher sich die Dämpferscheibe p bewegen kann. Diese ist nämlich durch den festen Arm b an der Achse z der beweglichen Rolle befestigt, und wenn diese sich dreht, so bewegt sich die Scheibe in der Röhre, wobei wegen des engen Zwischenraums die Luftreibung eine starke Dämpfung ausübt. Eigentlich sollten die feste Spule und

Fig. 232.



Fig. 233.



die bewegliche von demselben Strom durchflossen werden, die beiden Spulen also hintereinander geschaltet werden. Da aber die dünnen Aufhängedrähte der beweglichen Spule von den starken zu messenden Strömen nicht durchflossen werden dürfen, so sind bei diesen Instrumenten die feste (Hauptspule) und die bewegliche Spule (Nebenspule) parallel geschaltet, wie die Skizze in Fig. 234 zeigt. Wenn bei allen Stromstärken und Perioden der Widerstand der festen und der beweglichen Spule derselbe bleiben würde, so würde die Ablenkung der beweglichen Spule direkt die Stromstärke messen. Aber die Widerstände beider Spulen ändern sich erstens durch Joulesche Wärme und zweitens mit der Periodenzahl, wie wir gleich sehen werden. Um den Einfluß dieser Änderungen möglichst gering zu machen, so daß er für praktische Zwecke verschwindet, ist erstens zu der festen Rolle noch ein Vorschaltwiderstand im Boden des Apparates angebracht, der aus Manganin gefertigt ist und bifilar gewickelt ist, also keinen Temperatureinfluß und kein Selbstpotential besitzt, und ist zweitens auch vor die bewegliche Rolle ein ebensolcher Widerstand vorgeschaltet. Dadurch sind die Einflüsse der Temperatur und Periodenzahl praktisch beseitigt. Bei $X X_1$ wird der zu messende Strom eingeschaltet. Die feste Rolle erhält übrigens zwei verschiedene solcher Vorschaltwiderstände, von denen man durch den Stöpsel bei $A A_1$ den linken, durch den Stöpsel bei $B B_1$ den linken und rechten zusammen einschalten kann. Dadurch bekommt das Amperemeter zwei Meßbereiche. Je nach der Ausführung der Instrumente gibt es solche für schwache Ströme, die von 6 bis 30 Milliampere messen, und andererseits solche für starke Ströme von 40 bis 200 Ampere.

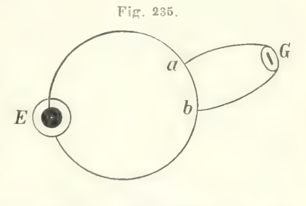
Fig. 234.

Außer diesen Elektrodynamometern mit Rollen kann man aber auch noch eine zweite Art von Elektrodynamometern konstruieren, nämlich solche mit weichem Eisen. Wenn man nämlich statt der beweglichen Rolle eine Nadel aus unmagnetischem weichen Eisen innerhalb der festen Rolle aufhängt, so hat man offenbar ebenfalls ein Elektrodynamometer, welches auf Wechselströme reagiert. Denn der Strom, der in der festen Rolle zirkuliert, erregt in der Nadel aus weichem Eisen Magnetismus und macht sie also zu einer temporären Magnetnadel, die durch den Strom abgelenkt wird. Wechselt nun der Strom in der festen Rolle seine Richtung, so wechselt auch die Lage der Pole in der Nadel und die Nadel bleibt daher wieder nach derselben Richtung abgelenkt. Damit ein solches,

prinzipiell sehr vorteilhaftes Instrument aber wirklich exakt wirke, ist notwendig, daß das weiche Eisen der Nadel den Magnetismus a tempo annimmt und wechselt, gleichzeitig mit der Stromstärke, ohne etwas von dem früheren Magnetismus zurückzubehalten. Dies ist nur schwer und kaum auf die Dauer sicher zu erreichen, und daher sind die Elektrodynamometer nach diesem Prinzip für wissenschaftliche Zwecke kaum, dagegen für technische Zwecke häufig im Gebrauch, wenn es bei diesen nicht auf die höchste Genauigkeit ankommt. Bei den technischen Meßinstrumenten für Wechselstrom im zweiten Abschnitt werden wir derartige Apparate zu besprechen haben.

Wenn man so mit den Elektrodynamometern die Stärke von Wechselströmen messen kann, so kann man dieselben Apparate aber auch zur Messung von Spannungsdifferenzen benutzen. Sie messen bei Wechselströmen dann die mittlere Spannungsdifferenz zwischen zwei Punkten eines Stromkreises, die man auch die effektive Spannung nennt. Zu dem Zwecke hat man bloß (Fig. 235) ein solches Elektrodynamometer G als Zweigleitung an die beiden Punkte des Stromkreises a und b anzulegen, deren Spannungsdifferenz man messen will. Die Angabe des Elektrodynamometers, die an der Teilung desselben abgelesen wird, ist direkt der gesuchten effektiven Spannungsdifferenz zwischen a und b proportional, aus genau demselben Grunde, wie ein Galvanometer in der Zweigleitung die Spannungsdifferenz mißt (S. 100).

Fig. 235.



Zur bequemen Ausführung dieser Messungen werden von Siemens & Halske Präzisionsvoltmeter für Gleichstrom und Wechselstrom hergestellt, welche den eben beschriebenen Präzisionsamperemetern ganz analog gebaut sind. Jedes dieser Instrumente hat auch eine feste Rolle mit einem oder zwei Vorschaltwiderständen, die ohne Temperaturabhängigkeit und ohne Selbstpotential sind und von diesen zweigt die bewegliche Rolle ab. Man hat so in jedem Instrument zwei Meßbereiche, z. B. von 3 bis 15 und von 6 bis 30 Volt messend. Will man größere Spannungen messen, also das Instrument weniger empfindlich machen, so schaltet man den Instrumenten noch einen abgemessenen induktionsfreien Widerstand vor, wodurch die Empfindlichkeit auf die Hälfte, ein Drittel u. s. w. herabgesetzt ist, so daß die Ablesung nicht direkt die Volt angibt, sondern 2-, 3-, 4mal so viel Volt, als man abliest.

So haben wir also nun die Mittel, um die effektiven Stromstärken und Spannungen eines Wechselstromes zu messen.

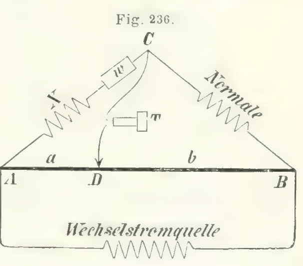
Bisher hatten wir angenommen, daß der Wechselstrom durch eine Leitung gesendet wird, die kein erhebliches Selbstpotential hat, also etwa durch eine bifilar gewickelte Rolle oder durch einen ausgespannten Draht. Wenn man aber Wechselströme durch einen Leiter sendet, dessen Selbstpotential erheblich ist, etwa durch eine gewöhnlich gewundene Drahtrolle oder noch besser durch eine Drosselspule, so entstehen ja in diesem Leiter Extraströme, weil die Richtung und die Stärke des Stromes

sich fortwährend ändert. Und diese Extraströme wirken immer der vorhandenen elektromotorischen Kraft entgegen. Daraus folgt aber, daß die Stromstärke, die in einer solchen Rolle von der vorhandenen elektromotorischen Kraft hervorgebracht wird, kleiner sein wird, als sie dem Ohmschen Gesetz entspricht. Denn tatsächlich wirkt nicht die äußere elektromotorische Kraft allein, sondern diese abzüglich der entstehenden elektromotorischen Kraft des Extrastromes. Bei derselben äußeren elektromotorischen Kraft ist also die Stromstärke in einer solchen Rolle kleiner, als sie bei einem Gleichstrom sein würde, d. h. es macht den Eindruck, als ob der Widerstand der Rolle gegen Wechselströme größer ist, als gegen konstante Ströme. Eine solche Rolle zeigt daher eine scheinbare Vergrößerung des Widerstandes gegen Wechselströme. Man bezeichnet den scheinbaren Widerstand einer Rolle, den sie gegen Wechselströme zeigt, als ihre Impedanz, zum Unterschied von dem gewöhnlichen (Ohmschen) Widerstand, den die Rolle gegen Gleichströme hat. Die Impedanz ist immer größer als der Widerstand, und zwar um so mehr, je rascher die Wechselströme aufeinander folgen, je größer, wie man es nennt, die Frequenz der Wechselströme ist, und um so mehr, je größer das Selbstpotential des Leiters ist. Bei einem geraden Draht oder bei einer bifilar gewickelten Rolle ist der Unterschied zwischen Impedanz und Ohmschem Widerstand gewöhnlich zu vernachlässigen, bei einer unifilar gewundenen Rolle dagegen ist er sehr erheblich. Eine bifilar gewickelte Rolle hat bei Wechselströmen denselben Widerstand wie bei Gleichströmen. Aus diesem Grunde muß man z. B. die Widerstandsrollen, welche man in den Widerstandskästen braucht, stets bifilar wickeln, wenn man sie auch für Wechselströme benutzen will. Man unterscheidet deshalb bei Wechselströmen immer die Leitungen, durch die der Strom fließt, als induktionsfreie, wenn sie kein erhebliches Selbstpotential besitzen, und als induktive, wenn sie ein solches von erheblicher Größe besitzen. Ganz induktionsfrei ist natürlich streng genommen gar keine Leitung. Man sieht sofort, daß eine stark induktive Leitung, wie etwa eine Drosselspule, die in den Kreis einer Wechselstromspannung eingeschaltet ist, den Strom viel mehr schwächt, als es ihrem gewöhnlichen Widerstand entspricht. Es kommt eben nicht ihr Widerstand, sondern ihre Impedanz in Betracht. Eine solche Rolle mit Eisenkern kann einen 1000mal größeren Widerstand für Wechselstrom als für Gleichstrom haben, sie läßt also von einem Wechselstrom fast nichts hindurch, während ein Gleichstrom sie ungehindert passiert. Deswegen gerade bezeichnet man solche Spulen mit großem Selbstpotential als Drosselspulen, weil sie den Strom (aber nur einen Wechselstrom) gewissermaßen abdrosseln.

Das Selbstpotential von Drähten spielt also bei Wechselströmen eine ebenso wichtige Rolle, wie der gewöhnliche Ohmsche Widerstand bei Gleichströmen. Es wurden daher auch Methoden und Apparate ausgebildet, um Selbstpotentiale ebenso leicht und bequem bestimmen zu können, in Henry ausdrücken zu können, wie man Widerstände in Ohm ausdrückt. So wie man für die letzteren Normalohm oder geeichte Widerstände hat und mit diesen den zu messenden Widerstand vergleicht, so hat man zur Messung des Selbstpotentials Normale der Selbstinduktion, welche auf S. 228 schon besprochen

und abgebildet sind. Zur Vergleichung eines unbekannten Selbstpotentials mit einem Normale dient am einfachsten wieder die Wheatstonesche Brücke, aber mit Wechselstrom betrieben. In Fig. 236 ist die Schaltung dargestellt. Ein Wechselstromerzeuger dient als Stromquelle, links bei X ist das zu messende Selbstpotential und ein gewöhnlicher Widerstandskasten w, rechts ist das Normale (z. B. 1 Henry) angebracht. In die Brücke ist ein Telephon T eingeschaltet. Man verschiebt nun den Kontakt D auf einem ausgespannten Draht so lange, bis der Ton im Telephon möglichst schwach wird. Dann schaltet man aus w Widerstände aus und verschiebt D wieder und zwar so lange, bis man ein ganz scharfes Minimum des Tons erhält. Dann verhält sich das gesuchte Selbstpotential von X zu dem bekannten des Normales wie die Längen der Drahtstücke a und b. Zugleich verhält sich dann auch der Wechselstromwiderstand (Impedanz) im Zweige AC zu dem Widerstand im Zweige CB ebenfalls wie diese Längen. Wenn man vorher oder nachher mit Gleichstrom den gewöhnlichen Widerstand von A C mißt, so kann man zugleich die Vergrößerung des Widerstandes der gemessenen Rolle bei Wechselstrom gegenüber Gleichstrom festlegen.

Fig. 236.



Der von Siemens & Halske konstruierte Apparat, der zu diesen Messungen dient, ist in Fig. 237 gezeichnet. Er ist ähnlich wie das Universalgalvanoskop gebildet. Der ausgespannte Draht ist kreisförmig in die Nut der geteilten Schieferplatte eingelegt. Ein Kontakt kann an diesem Kreisdraht entlang geführt werden. Auf der Schieferplatte sitzt ein Präzisionsamperemeter, dessen Skala man sieht. Der Widerstandskasten w ist, wie die Stöpsel zeigen, im Kreise um das Amperemeter angeordnet. Zur Messung der Selbstinduktion und der Impedanz einer Rolle wird diese an die unten sichtbaren Klemmen X X angeschlossen. Die Wechselstromquelle, die gleich beschrieben werden soll, wird an die Klemmen S angelegt. An N wird das Normale der Selbstinduktion und an T das Telephon angeschlossen und ein am Apparat angebrachter Stöpsel wird in das Loch W gesteckt. Dann besteht also die Messung darin, daß man abwechselnd den Schleifkontakt verstellt und Widerstände aus dem Kasten zieht, bis man ein scharfes Tonminimum im Telephon hat. Das Verhältnis der Längen des Schleifdrahtes, das man direkt auf der Schieferplatte abliest, gibt dann sofort das Verhältnis des gesuchten Selbstpotentials zu dem bekannten des Normales. Um auch die scheinbare Widerstandsvermehrung zu ermitteln, muß man noch den gewöhnlichen Gleichstromwiderstand kennen. Zu dem Zweck wird der Stöpsel in das Loch G gesteckt, wodurch das Amperemeter (das bei der Messung des Selbstpotentials gar nicht gebraucht wurde) eingeschaltet ist und ein galvanisches Element an die Klemmen B gelegt, und nun wird gerade so verfahren, wie beim Universalgalvanometer.

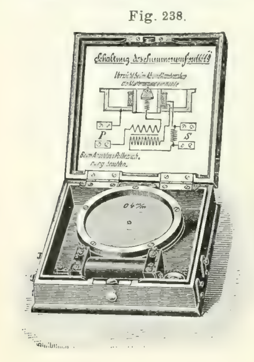
Als Quelle für den Wechselstrom kann man für dieses Instrument

nicht einen gewöhnlichen kleinen Induktionsapparat mit Neefschem Hammer nehmen, weil der Stromverlauf in dessen sekundärer Spule,

Fig. 237.

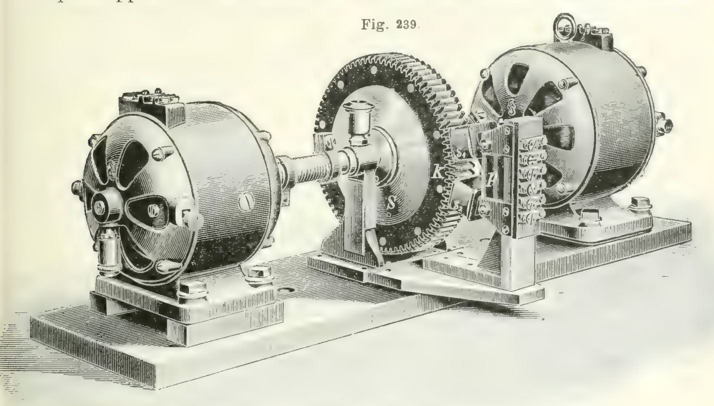
wie wir wissen (S. 213), kein einfach periodischer ist und weil das Telephon im obigen Apparat nur bei einfach periodischen Wechselströmen ein scharfes Tonminimum ergibt. Man kann aber den Neefschen Hammer ersetzen durch ein kleines Instrument, welches Fig. 238 zeigt und welches als Summerumformer bezeichnet wird. Bei diesem werden durch eine hin und her schwingende Telephonmembran einfach periodische Schwankungen in einem primären Strom und daher einfach periodische Wechselströme in einer von diesem induzierten Sekundärspule erzeugt. Die auf dem Deckel des Kästchens angebrachte Zeichnung stellt die Schaltung dar. Bei P wird Gleichstrom von 4 Volt eingeleitet, bei S wird Wechselstrom abgenommen. Man erhält auf diese Weise einen Wechselstrom von etwa 550 Perioden pro Sekunde.

Fig. 238.



Das Selbstpotential sowohl, wie die Widerstandsvergrößerung hängen aber wesentlich ab von der Periode des Wechselstromes. Bei raschen Wechseln sind sie größer als bei langsamen. Man muß deshalb die Messung dieser Größen bei irgend einem Apparat möglichst bei denjenigen Perioden vornehmen, für welche man ihn auch benutzen will. Um nun noch sehr viel raschere Wechsel, bis zu 6000 in der Sekunde, in einer Wechselstromquelle zu erzeugen, und zwar einfach-periodische, haben Siemens & Halske eine Maschine konstruiert, welche als Hochfrequenzmaschine bezeichnet wird. In Fig. 239 stellt der mittlere Teil gerade diese Maschine dar, die Apparate rechts und links sind nur zwei Elektromotoren, welche zum Drehen dieser Maschine benutzt werden. Der Hochfrequenzapparat selbst besteht aus einem Zahnrad S, mit 100 Zähnen,

Fig. 239.



welches aus mehreren hundert dünnen Blechscheiben zusammengesetzt ist, die voneinander isoliert und durch den Kranz k aus Hartgummi zusammengehalten sind. Dieses Rad dreht sich vor den Polen eines Hufeisenmagneten, der durch die Rolle p magnetisiert wird. Die Pole selbst aber tragen zwei Wickelungen s_1 und s_2, und in diesen wird der Hochfrequenzstrom erzeugt. Durch die rasche Annäherung und Entfernung der Zähne nämlich unterliegt der Magnetismus der Pole fortwährenden Schwankungen und diese induzieren in s_1 und s_2 einen einfach periodischen Wechselstrom. Bei einer Umdrehung der Scheibe erhält man so 100 Perioden, und wenn die Elektromotoren der Scheibe eine Geschwindigkeit von 35—60 Umdrehungen pro Sekunde erteilen, was sich erreichen läßt, so sieht man, daß man einen Wechselstrom von 3500—6000 Perioden in der Sekunde erhält. Damit die Schwankungen in dem Magnetismus des Elektromagnets, die auch auf die Spule p induzierend wirken, nicht in dieser auch Wechselströme erzeugen, ist in die Stromzuleitung zu dieser eine Drosselspule (S. 248) eingeschaltet, welche diese Wechselströme bis zur Unmerklichkeit schwächt. Eine kleinere, billigere Maschine nach demselben Prinzip liefert einen Wechselstrom von 1000 bis 2000 Perioden pro Sekunde.

Mittels dieser sehr sorgfältig durchgearbeiteten Apparate ist es jetzt also möglich, in sehr kurzer Zeit Selbstinduktionen von Rollen zu bestimmen, eine Aufgabe, die früher in den Laboratorien immer als eine Haupt- und Staatsaktion galt.

Wir kehren nun zu der Betrachtung der Eigenschaften der Wechselströme zurück. Haben wir schon bisher eine Reihe von wesentlichen Unterschieden im Verhalten eines Wechselstromes und Gleichstromes gefunden, so werden diese Unterschiede noch größer, wenn wir nun *zwei Ströme gleichzeitig* betrachten, also z. B. einen Wechselstrom sich verzweigen lassen. Zwei verschiedene Gleichströme unterscheiden sich nur durch ihre Stromstärke und ihre Richtung. Wenn daher zwei solche Gleichströme zu gleicher Zeit durch einen und denselben Draht fließen, so ist die Stromstärke in dem Draht die Summe oder die Differenz der beiden einzelnen Stromstärken. Ganz anders ist es bei Wechselströmen. Zwei verschiedene Wechselströme können sich durch drei verschiedene Dinge unterscheiden. Erstens kann die (effektive) *Stromstärke* in beiden verschieden sein, wie bei Gleichströmen. Zweitens kann die *Periode* bei beiden verschieden sein, der eine kann z. B. eine Periode von $^{1}/_{10}$ Sekunde, der andere eine von $^{1}/_{250}$ Sekunde haben. Aber selbst wenn die Perioden beider Wechselströme gleich sind, können sie sich noch dadurch unterscheiden, daß sie nicht gleichzeitig ihre maximalen Werte erreichen, also auch nicht gleichzeitig durch Null hindurchgehen

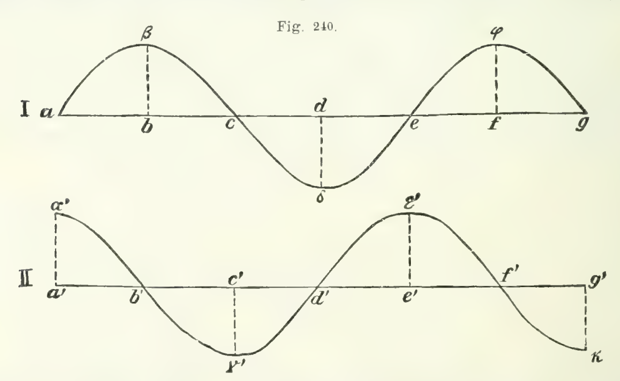


Fig. 240.

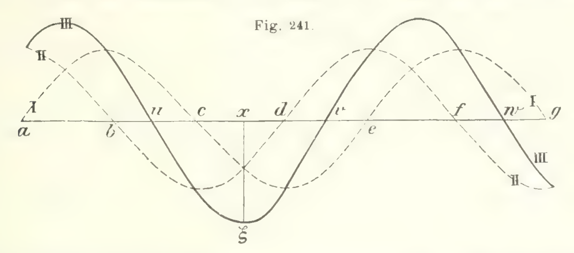
und ihre Richtung ändern. Dieser Unterschied besteht aber darin, daß die beiden Wechselströme *verschiedene Phasen* (S. 242) haben.

Wenn wir z. B. in unserer Maschine auf S. 222 außer den Rollen R R' noch zwei andere miteinander verbundene Rollen auf derselben Achse anbringen, so jedoch, daß diese beiden um je 90° von R und R' abstehen, so wird, wenn die Achse mit den Rollen rotiert, immer das eine Rollenpaar im Maximum der Induktion sein, wenn auf das andere gerade keine Induktion ausgeübt wird und umgekehrt. Die Ströme der beiden Rollenpaare haben dann dieselbe Periode, aber einen Phasenunterschied von 90° gegeneinander. Durch eine Zeichnung kann man sich solche zwei Wechsel-

ströme von gleicher Periode, aber mit einem Phasenunterschied leicht versinnlichen. In Fig. 240 sind zwei Wechselströme gezeichnet, deren Phasen um 90° verschieden sind. In den Punkten a und a', also in demselben Moment, herrscht in I die Stromstärke 0, in II aber die maximale Stromstärke a' α'. In den Punkten b und b' ist umgekehrt in I die maximale Stromstärke β b, in II die Stromstärke 0 vorhanden. In den Punkten c und c' ist in I wieder die Stromstärke 0, in II die maximale Stromstärke c' γ' nach der entgegengesetzten Seite vorhanden u. s. w.

Denken wir uns nun von den beiden Rollenpaaren die Ströme gleichzeitig durch denselben äußeren Draht geschickt, so addieren sich in jedem Moment die vorhandenen Stromstärken. In Fig. 241 sind die beiden früheren Kurven I und II punktiert gezeichnet und die Kurve III, die stark ausgezogen ist, gibt in jedem Moment die Summe der Stromstärken, sie stellt die R e s u l t a n t e der beiden Wechselströme dar. Man sieht daraus zunächst, daß die maximale Stromstärke in der Resultante zwar größer ist, als die maximale Stromstärke in jedem der beiden Wechsel-

Fig. 241.



ströme, aber kleiner als die Summe der beiden ist. Man sieht zweitens, daß die Periode der Resultante dieselbe ist wie die der beiden Wechselströme (zwischen u und w ist dieselbe Strecke wie zwischen a und e oder wie zwischen b und f). Aber die P h a s e der Resultante ist eine andere, als die der beiden Wechselströme. Denn während die Kurve II im Punkt b durch Null nach unten hindurchgeht, die Kurve I im Punkt c, geht die Resultante III im Punkte u — zwischen beiden — durch Null hindurch. Ihr Phasenunterschied gegen I ist also nicht Null — dann würde sie bei c durch Null gehen, auch nicht 90° — dann würde sie bei b durch Null hindurchgehen — sondern liegt zwischen 0° und 90°. In unserem Fall ist er gleich 45°. Allgemein sehen wir daraus: w e n n z w e i W e c h s e l s t r ö m e v o n g l e i c h e r P e r i o d e, a b e r v o n v e r s c h i e d e n e r P h a s e d u r c h e i n e n D r a h t g e s e n d e t w e r d e n, s o h a t d e r r e s u l t i e r e n d e W e c h s e l s t r o m e i n e a n d e r e P h a s e a l s j e d e r d e r i h n z u s a m m e n s e t z e n d e n W e c h s e l s t r ö m e, es tritt, wie man es nennt, eine P h a s e n v e r s c h i e b u n g ein.

Die P h a s e resp. der P h a s e n u n t e r s c h i e d tritt also als neues, und zwar unangenehm komplizierendes Element ein, wenn man es mit Wechselströmen zu tun hat. Der Phasenunterschied hat nun verschiedene Folgen, durch welche die Wechselströme sich ganz anders verhalten wie Gleichströme.

Wenn man eine periodische elektromotorische Kraft auf einen Leiter wirken läßt, welcher erhebliches Selbstpotential besitzt, also etwa auf eine Drahtrolle oder eine Drosselspule, so muß der Strom in diesem Leiter eine andere Phase haben als die elektromotorische Kraft, die Stromumkehrungen können in ihm nicht in demselben Moment stattfinden, in welchem die Umkehrungen der elektromotorischen Kraft stattfinden. Denn außer der gegebenen elektromotorischen Kraft wirkt dann ja auf den Leiter noch die elektromotorische Kraft des Extrastromes, die Selbstinduktion, und zwar ist diese am größten, wenn die Stromstärke durch Null hindurchgeht und ihre Richtung wechselt, sie hat also eine andere Phase als die äußere elektromotorische Kraft, und daher muß der Strom selbst, der von dem Zusammenwirken der beiden elektromotorischen Kräfte herrührt, auch eine Phasenverschiebung gegen die äußere elektromotorische Kraft, die ihn erzeugt, besitzen.

Daraus folgt nun eine höchst wichtige und zunächst sehr sonderbare Tatsache in Bezug auf den Effekt, die Anzahl der Watt, welche ein Wechselstrom besitzt. Bei Gleichströmen wissen wir (S. 115), daß der Effekt immer gleich dem Produkt aus der elektromotorischen Kraft (in Volt) und der Stromstärke (in Ampere) ist. Dieses Produkt gibt ohne weiteres die Zahl der Watt, welche der Strom mit sich führt. Bei einem Wechselstrom aber hat dieses Produkt zunächst in jedem Moment eine andere Größe, weil sowohl Spannung wie Stromstärke sich periodisch ändern. Wir müssen also hier wieder sagen, der wirkliche Effekt eines Stromkreises ist der Mittelwert aus allen Effekten, die er während einer halben Periode hat. Wenn nun keine Phasendifferenz zwischen Stromstärke und elektromotorischer Kraft stattfindet, d. h. wenn der Stromkreis induktionsfrei ist, so ist der Mittelwert der Watt gleich dem Produkt aus dem gemessenen Werte der (effektiven) Stromstärke und dem gemessenen Werte der (effektiven) Spannung. Dann hat man also noch immer denselben Fall wie bei Gleichströmen. Ist aber eine Phasendifferenz zwischen Strom und Spannung vorhanden, so ist die Anzahl der Watt stets kleiner als dieses Produkt. Untersuchen wir, um dies einzusehen, die beiden extremen Fälle, in denen einmal die Phasendifferenz 0^0 (also keine Phasendifferenz), das andere Mal die Phasendifferenz 90^0 zwischen Strom und Spannung vorhanden ist. In Fig. 242 und 243 soll die dick ausgezogene Linie die Stromstärke, die punktiert gezogene die Spannung bedeuten, und zwar wollen wir ihnen bestimmte Zahlenwerte zuschreiben. In Fig. 242 haben Strom und Spannung die gleiche Phase, beide fangen bei a mit 0 an, erreichen gleichzeitig ihre größten positiven Werte bei b ($b\beta = +3$ für die Spannung und $b B = +5$ für den Strom), nehmen wieder ab, gehen gleichzeitig bei c durch Null hindurch, bekommen negative Werte, und zwar gleichzeitig ihr negatives Maximum bei d (nämlich $d\,\delta = -3$ für die Spannung und $d\,D = -5$ für die Stromstärke) und nach Ablauf einer Periode kommen beide gleichzeitig nach e mit dem Wert Null. Die Zahl der Watt, welche der Strom mit sich führt, ist der Mittelwert aus dem Produkt der Volt und der Ampere. Einige Einzelwerte dieses Produktes sind folgende:

Bei a ist das Produkt gleich Null, bei b ist das Produkt gleich 15 ($+3 \times +5 = 15$), bei c ist es 0, bei d wieder gleich 15 ($-3 \times -5 = 15$),

bei $e = 0$. Die Zahl der Watt auf dem Wege a c ist also ebenso groß, wie die auf dem Wege c e. Der Effekt hat also einen zwischen 0 und 15 Watt liegenden Wert, sagen wir den Wert $7\frac{1}{2}$ Watt.

Ganz anders ist es bei Fig. 243, wo Stromstärke und Spannung eine Phasendifferenz von 90^0 haben. Hier ist bei a die Stromstärke Null und die Spannung gleich a α, gleich 3, also das Produkt gleich Null, bei b ist die Stromstärke gleich 5, aber die Spannung gleich Null, also das Produkt wieder Null; bei c ist das Produkt ebenfalls Null, weil die Stromstärke, und bei d ist es Null, weil die Spannung gleich Null ist. In den zwischenliegenden Punkten haben wir zwar immer Watt, welche nicht gleich Null sind, aber wir haben abwechselnd positive und negative Werte von gleicher Größe. Zwischen a und b sind die Stromstärke und Spannung beide

Fig. 242.

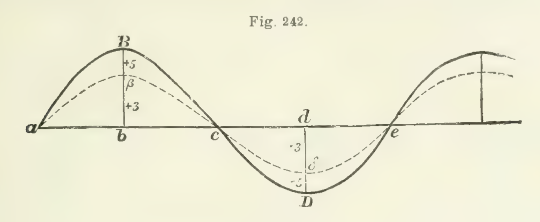
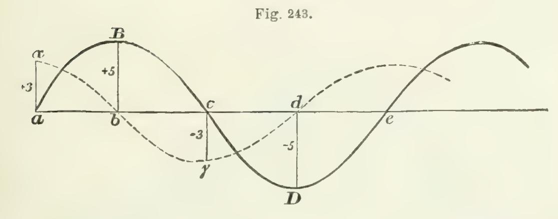


Fig. 243.



positiv, ihr Produkt also auch positiv, zwischen b und c ist aber die Stromstärke positiv, die Spannung negativ, ihr Produkt also negativ und zwar ebenso groß, aber negativ, wie zwischen a und b. Daraus folgt, daß der ganze Effekt eines solchen Stromes gleich Null ist.

Ein Wechselstrom, dessen Stromstärke eine Phasendifferenz von 90^0 gegen die äußere Spannung hat, die ihn erzeugt, hat den Effekt Null, d. h. er führt keine Energie mit sich, er führt keine Watt.

Man bezeichnet einen solchen Strom deshalb als wattlosen Strom.

Vollkommen wattlose Ströme kann man allerdings nicht herstellen, aber man kann sich diesem Zustand, bei dem Strom und Spannung einen Phasenunterschied von 90^0 haben, sehr nähern.

Haben wir nun einen Wechselstrom, dessen Phasendifferenz gegen die Spannung nicht die extremen Werte 0^0 und 90^0, sondern dazwischen liegende Werte hat, so ist der Effekt dieses Stromes abhängig von dieser

Phasendifferenz. Die Zahl der Watt, die ein solcher Strom mit sich führt, ist gleich dem Produkt aus der Spannung (in Volt), und der Stromstärke (in Ampere), aber noch multipliziert mit einer Zahl, die zwischen 1 und 0 liegt, also einem echten Bruch, der von der Phasendifferenz abhängt. Wir wollen ihn den Phasenfaktor nennen. (Er ist einfach gleich dem Kosinus der Phasendifferenz.) Der Phasenfaktor ist 1 für die Phasendifferenz 0^0, er ist 0 für die Phasendifferenz 90^0, und es ist allgemein:

Effekt eines Wechselstroms = Spannung × Stromstärke × Phasenfaktor.

Es sieht also so aus, und es ist auch in der Tat so, als ob nicht die ganze beobachtbare Stromstärke bei einem Wechselstrom zur Berechnung des Effektes angewendet werden darf, sondern nur ein Bruchteil derselben, nämlich die beobachtete Stromstärke multipliziert mit dem Phasenfaktor (einem echten Bruch). Diesen Bruchteil der beobachtbaren Stromstärke bezeichnet man als die Stromstärke des Nutzstromes. Es ist also die

Stromstärke des Nutzstromes = wirkliche Stromstärke × Phasenfaktor

und es ist der

Effekt eines Wechselstromes = Spannung × Stromstärke des Nutzstromes.

Wirkt in dem Stromleiter, dessen Effekt man messen will, keine erhebliche Induktion, ist er also induktionsfrei, etwa ein gerade ausgespannter Draht oder eine Glühlampe oder eine Bogenlampe, so ist der Phasenfaktor nahezu gleich 1. Wirkt aber erhebliche Selbstinduktion in dem Stromstück, besteht er z. B. aus einer Drosselspule oder einem sonstigen Elektromagnete oder einem Elektromotor, ist also der Widerstand induktiv, so kann der Phasenfaktor nahezu gleich Null werden.

Aus diesen Überlegungen folgt sofort, daß man bei Wechselströmen nicht durch Messung der Spannung für sich und der Stromstärke für sich den Effekt ermitteln kann, sondern daß man im Gegenteil versuchen muß, den Effekt direkt zu messen. Das geht nun auch an, und die Apparate, die diese Messung ermöglichen, nennt man Wattmeter. Sie müssen also direkt das Produkt aus Stromstärke, Spannung und Phasenfaktor zu messen gestatten, wie diese in einem bestimmten Stromkreis vorhanden sind.

Auch für diese Messungen läßt sich das Elektrodynamometer verwenden und zwar in folgender Einrichtung. Die feste Rolle des Elektrodynamometers läßt man von dem Strom, dessen Effekt man messen will, direkt durchfließen. Die bewegliche Rolle aber schaltet man parallel zu dem Leiter, in dem der Effekt gemessen werden soll, man legt sie in den Nebenschluß zu ihm. Dann wissen wir aus früheren Betrachtungen, daß in der beweglichen Rolle ein Strom fließt, der proportional ist der zu messenden Spannung. Vorausgesetzt, was wir zunächst als erfüllt annehmen wollen, daß die bewegliche Rolle nicht selbst eine Phasenverschiebung hervorbringt, ist dann die Ablenkung der beweglichen Rolle gerade dem Effekt proportional, d. h. dem Produkt aus Stromstärke, Spannung und Phasenfaktor. Im allgemeinen aber ist die bewegliche Rolle selbst induktiv und wenn sie Ausschläge macht, also verschiedene Lagen gegen die feste Rolle einnimmt, so wirken die beiden Rollen noch in verschiedener Weise aufeinander und der induktive Widerstand der beweglichen Rolle ist also sogar variabel. Trotz dieser Schwierigkeiten

ist es zuerst Siemens & Halske gelungen, ein Wattmeter nach diesem Prinzip zu konstruieren, welches durch einen Zeiger direkt die Anzahl der Watt abzulesen gestattet und welches sehr genaue Angaben macht, so daß es als Präzisionsapparat bezeichnet werden kann. Äußerlich unterscheidet sich das Präzisionswattmeter nicht wesentlich von den vorher dargestellten Strom- und Spannungsmessern. Im Innern enthält es zunächst eine dünndrähtige, bewegliche Spule. Diese, Fig. 244, trägt innen je eine Spitze oben und unten, mit denen sie sich auf Saphiren dreht, die, wie Fig. 245 zeigt, an einem Lagerbock befestigt sind. Derselbe Bock trägt auch oben die Röhre d für die Luftdämpfung. Die feste Spule wird entweder aus Drähten, oder bei starken Strömen, wie Fig. 246 zeigt, aus isolierten Blechstreifen zusammengesetzt. Das Innere des ganzen Wattmeters zeigt Fig. 247. Man sieht die feste Rolle f und innerhalb derselben die bewegliche b, hinten auf dem Lagerbock die Luftdämpfung d. Die bewegliche Rolle, die aus einigen hundert Windungen feinen Drahtes besteht, hat naturgemäß eine nicht unbeträchtliche Selbstinduktion (von mehr als 5 Millihenry), würde also eine wesentliche

Fig. 244.

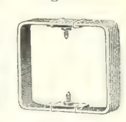


Fig. 245.

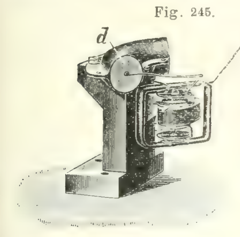


Fig. 246.

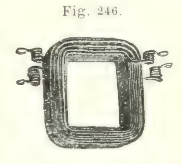
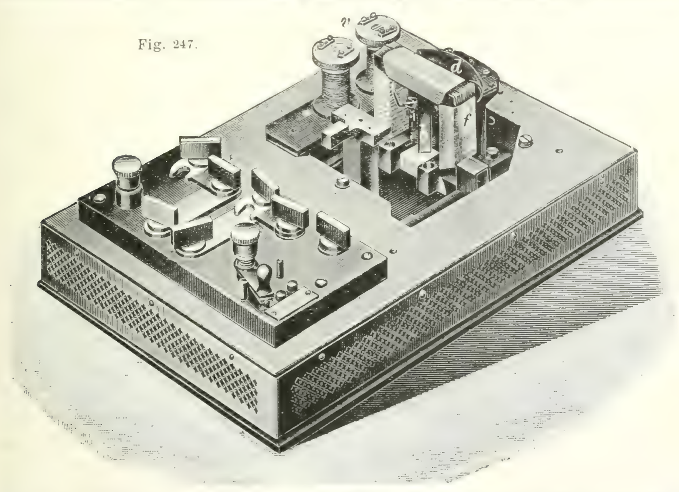


Fig. 247.



Phasenverschiebung hervorbringen. Man kann aber diese Phasenverschiebung auf einen sehr kleinen Wert bringen, wenn man noch einen sehr

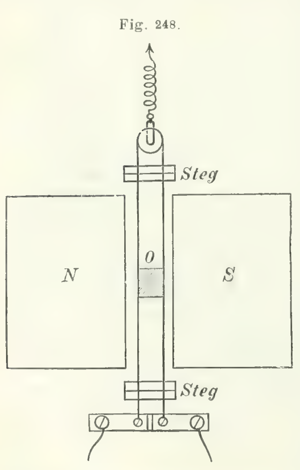
großen Widerstand ohne merkliches Selbstpotential vor die bewegliche Rolle schaltet, ebenfalls in den Nebenschluß. Faktisch bewirkt ein solcher großer induktionsfreier Widerstand, daß im Nebenschluß der Strom stark geschwächt wird, daß daher die Extraströme selbst ebenfalls geschwächt werden, und daß mithin die Phasendifferenz gegen die Spannung an den Enden eine zu vernachlässigende ist. Während die bewegliche Rolle bei diesen Instrumenten selbst 100 Ohm Widerstand besitzt, hat sie mit dem Vorschaltwiderstand zusammen 1000 Ohm. Man sieht den Vorschaltwiderstand in Gestalt von zwei Rollen v in Fig. 247. Auf diese Weise gibt der Ausschlag der beweglichen Rolle direkt den Effekt in dem untersuchten Drahtstück.

Wenn man nun bei Wechselströmen mit allen drei Apparaten ausgerüstet ist, dem Amperemeter, Voltmeter und Wattmeter, so kann man offenbar für jedes Stromstück auch den Phasenfaktor experimentell messen. Man bestimmt einerseits den effektiven Strom und die effektive Spannung und andererseits die wirklichen Watt. Die letztere Größe dividiert durch das Produkt aus Stromstärke und Spannung ist der Phasenfaktor des betreffenden Stromstücks:

$$\text{Phasenfaktor} = \frac{\text{Anzahl der Watt}}{\text{Anzahl der Ampere} \times \text{Anzahl der Volt}}.$$

Indes für eine genauere Untersuchung der Wechselströme genügt es nicht, wenn man bloß die effektiven Werte der Stromstärke und Spannung kennt und dann auch mittels des Wattmeters den Effekt und den Phasenfaktor. Es kommt bei genaueren Untersuchungen auch darauf an, zu wissen, ob der Wechselstrom wirklich einfach periodisch ist, wie wir es im allgemeinen bisher angenommen haben, oder ob der Strom oder die Spannung Abweichungen von dieser einfachen Form zeigen. Kurz, man muß und will den ganzen Verlauf des Stromes und der Spannung, nicht bloß die effektiven Werte kennen. Derartige Untersuchungen sind in den letzten Jahren immer wichtiger geworden, und ein Apparat, der diese leicht auszuführen gestattet, ist der Oszillograph, der in Deutschland von Siemens & Halske hergestellt wird. Es sei hier nur das Prinzipielle dieses interessanten und wichtigen Instrumentes angegeben. Zwischen den Polen eines Magneten N S (Fig. 248) ist eine sogenannte Meßschleife ausgespannt. Diese besteht aus einem außerordentlich dünnen Draht (nur Hundertstel von Millimetern dick), der unten an den Stromzuführungsklemmen befestigt ist, über zwei Stege und dann über eine lose Rolle geht, die an einer Feder befestigt ist. An den Drähten ist ein sehr kleiner Spiegel O von weniger als 1 qmm Fläche befestigt. Der ganze Draht

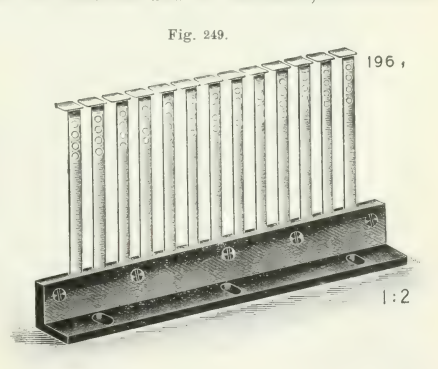
Fig. 248.



mit dem Spiegel wiegt weniger als $^1/_2$ mg, hat also so wenig Trägheit, daß er rasch veränderlichen Einflüssen unmittelbar folgt. Der ganze Draht mit der Spannvorrichtung befindet sich in einer Röhre, und die Röhre wird durch Schrauben horizontal und vertikal justiert. Durch den Draht fließt nun der zu untersuchende Wechselstrom (resp. eine Abzweigung desselben). Unter dem Einfluß des Magnetfeldes wird nun nach der Linken-Hand-Regel (S. 182) der eine Draht nach vorn, der andere nach hinten bewegt, d. h. die Ebene des Drahtes dreht sich und mit ihr der Spiegel. Wegen der Leichtigkeit des Systemes folgt diese Drehung unmittelbar der augenblicklichen Stärke des durchfließenden Stromes. Ein auf den Spiegel fallender und von ihm reflektierter Lichtstrahl beschreibt daher auf einem rotierenden photographischen Film eine Kurve, welche direkt die Form des durch den Draht geschickten Wechselstromes angibt. Auf diese Weise erhält man die Kurve des Stromes, und wenn man die Meßschleife in den Nebenschluß legt, die Kurve der Spannung eines Wechselstroms direkt auf dem Film, nachdem man ihn photographisch entwickelt hat. Natürlich gehört zu dem Instrument noch weiter eine Beleuchtungsquelle, gewöhnlich eine Bogenlampe, ferner die Trommel, auf der der Film aufsitzt, mit einem Motor zu ihrer Drehung und weitere Nebenapparate, so daß ein vollständiger Oszillograph ein ziemlich kompliziertes und teures Instrument ist.

Zur genauen Kenntnis eines Wechselstroms gehört schließlich noch die Messung seiner Periode. Praktisch werden die Wechselströme gewöhnlich durch rotierende Maschinen geliefert, die Periode hängt dann ab von der Umdrehungszahl der Maschine und ist bestimmt, wenn diese bekannt ist. Indes sind solche Umdrehungszahlen im allgemeinen nicht konstant, sie ändern sich aus verschiedenen Gründen, und daher ist es wünschenswert, eine unabhängige Messung der Periode eines Wechselstroms in jedem Moment vornehmen zu können. Apparate dazu sind auf sehr verschiedene Weise konstruiert worden, wir wollen aber nur einen derselben anführen, welcher mit großer Genauigkeit namentlich kleine Abweichungen von der normalen Periode eines gegebenen Wechselstroms mit einem Blick zu messen gestattet, den Frequenzmesser von Hartmann & Braun in Frankfurt a. M. Dieser Apparat ist auf akustischem Prinzip aufgebaut. Er enthält nämlich eine Anzahl abgestimmter Stahlzungen, die je an dem einen Ende befestigt sind, während das andere Ende frei schwingen kann. Fig. 249 zeigt einen Satz solcher Stahlzungen, von denen jede oben ein weißes Blättchen trägt. Jede dieser Zungen hat vermöge ihrer Länge, Breite und Dicke eine ganz bestimmte eigene

Fig. 249.



Schwingungszahl (Frequenz), wenn sie auf irgend eine Weise zum Schwingen veranlaßt wird. Diese Veranlassung zum Schwingen wird nun hier durch den zu messenden Wechselstrom gegeben. Dieser wird nämlich um einen in dem Apparat befindlichen Eisenkern gesendet, so daß er dessen oberes Ende abwechselnd nordmagnetisch und südmagnetisch macht. Während jeder Periode wird der Kern also zweimal stark magnetisch, er erhält 2 Polwechsel. Der magnetisch gewordene Eisenkern zieht nun die Stahlzungen an und läßt sie, wenn er unmagnetisch geworden ist, wieder los, er erregt sie also zu Schwingungen. Tatsächlich wird aber nur diejenige Zunge wirklich Schwingungen ausführen, deren Schwingungszahl (Frequenz) übereinstimmt mit der Zahl der durch den Wechselstrom erzeugten Polwechsel, weil nur bei dieser die Anregung durch den Magneten immer in demselben Tempo stattfindet, wie die Eigenschwingung, während bei allen anderen die Anregung die Eigenschwingungen stört, und zwar um so mehr, je weiter die Frequenz der Eigenschwingung abweicht von der Zahl der Polwechsel. Es wird also nur diejenige Zunge stark schwingen, deren Frequenz mit der Zahl der Polwechsel übereinstimmt. Die Schwingungen der Zunge werden optisch sichtbar gemacht. Fig. 250 zeigt einen solchen Frequenzmesser, in welchem 42 Zungen angebracht sind, deren Frequenzen von 80 bis 120 je um 1 zunehmen. Haben die Polwechsel eine Frequenz, die zwischen 2 ganzen Zahlen liegt, so werden 2 oder 3 benachbarte Zungen in mehr oder minder starke Schwingungen versetzt, aus deren Schwingungsgröße man auch die Bruchteile der Frequenzen ermitteln kann. So zeigt Fig. 251 ein Schwingungsbild, wenn die Frequenzzahl nahezu 100 ist. Die Zunge 100 schwingt sehr stark, 99,5 und 100,5 mäßig, aber die letztere etwas stärker. Die genaue Frequenz wird also etwa 100,2 Polwechseln entsprechen. Die Frequenz des

Fig. 250.

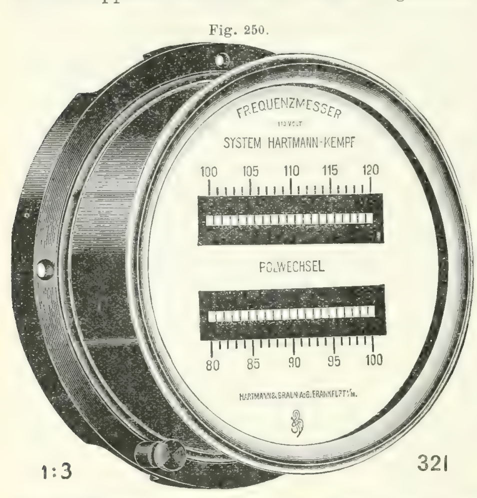
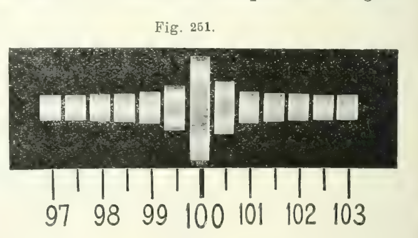


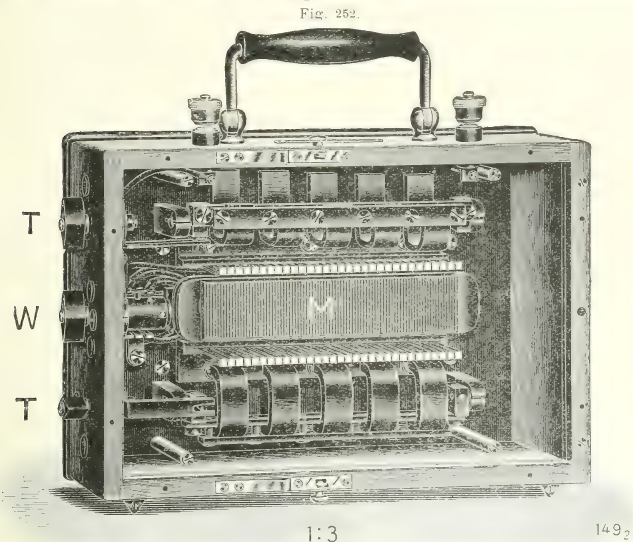
Fig. 251.



zu messenden Wechselstroms ist in jedem Falle gleich der halben abgelesenen Polwechselzahl, also in unserem Falle gleich 50,1. Die Periode des Wechselstroms ist der reziproke Wert seiner Frequenz, nämlich gleich $\frac{1}{50,1}$ Sekunden.

Das Innere eines solchen Frequenzmessers, bei dem auch noch einige weitere sehr bequeme Einrichtungen angebracht sind, zeigt der transportable Apparat Fig. 252. Man sieht in der Mitte den Elektromagneten M, oberhalb und unterhalb desselben je einen Zungensatz, wie ihn Fig. 249 darstellte. Um den Apparat an Wechselströme verschiedener

Fig. 252.

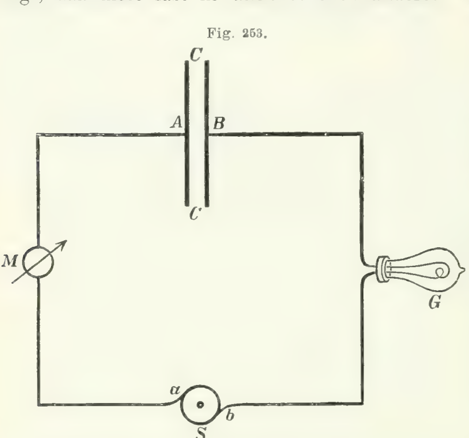


Spannung zwischen 50 und 250 Volt anlegen zu können, ist ein sogenannter Windungsschalter W angebracht, welcher die Zahl der vom Strom durchflossenen Windungen des Elektromagneten M in passender Weise zu regulieren gestattet. Der Apparat enthält 62 Zungen, die z. B. unten von 45 bis 60 Schwingungen je um eine halbe fortschreiten, oben von 60 bis 90 je um eine ganze. Man kann aber auch durch die Transpositionsschalter T den Meßbereich des Instrumentes auf das Doppelte erhöhen. Es sind nämlich oben und unten eine Anzahl permanenter Magnete angebracht, die durch die Schalter T gedreht werden können. Dreht man diese Magnete, so daß ein Pol derselben den Zungen zugewendet wird, so wird jetzt die Wirkung von M, wenn es gleiche Pole zeigt wie die permanenten Magnete, in bezug auf die Stahlzungen (die ja von M durch Influenz den entgegengesetzten Magnetismus erhalten)

stark geschwächt, wenn es ungleiche zeigt, sehr verstärkt, da im ersten Fall M und die permanenten Magnete einander entgegenwirken, im zweiten Falle sich unterstützen. Infolgedessen reagieren die Zungen jetzt wesentlich nur immer auf den zweiten Polwechsel, bei dem das Feld verstärkt ist, sie schwingen jetzt bei derjenigen Polwechselzahl, welche dem Doppelten ihrer Eigenfrequenz entspricht, so daß eine Zunge, welche ohne Einschalten der Magnete etwa bei der Polwechselzahl 60 starke Ausschläge machte, nun bei der Polwechselzahl 120 dasselbe tut. Auf diese Weise ist der Bereich der Messungen in einfacher Weise zu verdoppeln.

Unsere bisherigen Betrachtungen über Wechselströme haben uns gezeigt, daß diese fast in allen Stücken anderes Verhalten zeigen wie die Gleichströme. Ein noch auffallenderer Unterschied aber liegt darin, daß Gleichströme bekanntlich nur in ganz geschlossenen Kreisen fließen, während Wechselströme auch in ungeschlossenen Leitungen fließen und ihre Wirkungen hervorbringen. Wir wollen in dieser Hinsicht nur eine, aber die wichtigste Anordnung besprechen, die darin besteht, daß man einen Kondensator in die Leitung einschaltet. In Fig. 253 bedeutet C einen Kondensator, dessen beide Belegungen mit den Polen einer Stromquelle S verbunden sind. In die Leitungen sei bei G eine Glühlampe, bei M ein Amperemeter eingeschaltet. Wenn die Stromquelle S Gleichstrom liefert (z. B. eine Akkumulatorenbatterie oder eine Dynamomaschine für Gleichstrom ist), so fließt kein Strom in dem Kreis, das Amperemeter macht keinen Ausschlag und die Glühlampe brennt nicht. Durch den Kondensator ist eben der Kreis unterbrochen. Wenn aber S eine Wechselstromquelle ist, z. B. eine Wechselstrommaschine, und M etwa das oben beschriebene Amperemeter für Wechselstrom ist, so zeigt dieses trotz des Kondensators eine gewisse Stromstärke an, und die Glühlampe leuchtet. Wechselströme fließen also auch in dem ungeschlossenen, durch den Kondensator unterbrochenen Kreis.

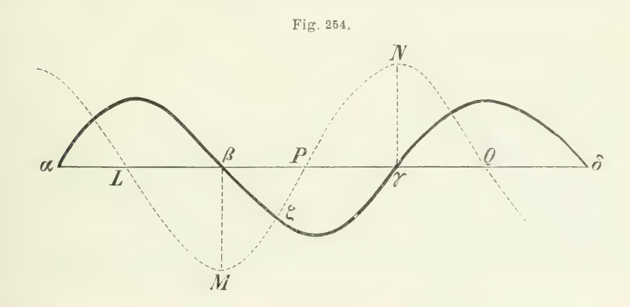
Fig. 253.



In der ersten Hälfte einer Periode nämlich, in der etwa der Pol a positiv ist, wird A positiv, B negativ geladen. Wenn dann die Richtung der Pole wechselt, so wird B positiv und A negativ geladen. Es fließen also fortwährend wechselnde L a d u n g s s t r ö m e durch die Leitung, und diese erregen das Amperemeter und die Glühlampe. Aber gleich-

zeitig verlaufen auch in dem Stromkreis Entladungsströme des Kondensators, und der wirkliche Strom setzt sich aus den Ladungsströmen und den Entladungsströmen zusammen. Daß solche Entladungsströme stattfinden, und wie sie wirken, läßt sich sofort einsehen. Wenn A im Maximum positiv geladen ist, B negativ, so hat der Kondensator eine bestimmte maximale Spannungsdifferenz in der Richtung A M S G B, beim Wechsel der Ladungsströme nimmt diese ab, wird Null und geht in die entgegengesetzte Richtung über. Wenn in Fig. 254 die stark gezeichnete Kurve $\alpha\,\beta\,\gamma\,\delta$ den Verlauf des Stromes darstellt, wie er wirklich in der Leitung herrscht, so ist auf dem ganzen ersten Teil von α bis β die eine Klemme in Fig. 253, etwa a, positiv, die Platte A bekommt also fortwährend positive Elektrizitätsmengen in erst zunehmender, dann abnehmender Stärke. Am Schluß ist also die Platte A des Kondensators am stärksten positiv geladen, d. h. der Kondensator sucht

Fig. 254.



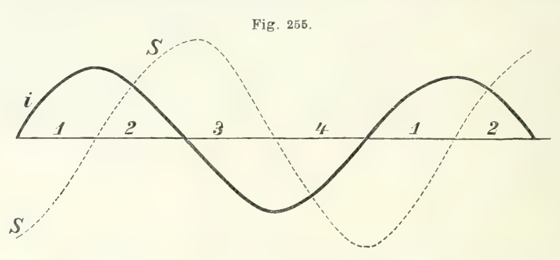
sich von A über a b nach B zu entladen. Die Spannung des Kondensators hat also an der Stelle β ein Maximum nicht in der Richtung des Stromes, sondern in der entgegengesetzten Richtung, sie wird also in Fig. 254 durch die Linie β M, die nach unten gezogen ist, dargestellt. Beim Wechsel des Stromes von β über ζ nach γ ist nun a negativ, folglich wird der Kondensatorplatte A negative Elektrizität zugeführt, ihre positive Ladung verringert sich also, sie wird allmählich neutralisiert und am Schluß dieser Halbperiode bei γ ist B positiv geladen, die Spannung sucht einen Strom von B über a b nach A, also in der Richtung des zuerst vorhandenen Stromes $\alpha\,\beta$ zu senden, die Spannung hat also den maximalen positiven Wert γ N. Bei L und bei P wird die Spannung 0. Man sieht, die Spannung des Kondensators ist auch wechselnd mit derselben Periode, aber sie hat eine Phasendifferenz gegen den Strom, und zwar eine Phasendifferenz von 90^0, da die Maxima der Spannung mit den Nullstellen des Stromes zusammenfallen und umgekehrt.

Daraus folgt aber sofort, daß der Strom gegen die äußere elektromotorische Kraft, die von der Stromquelle S (Fig. 253) herrührt, eine Phasendifferenz haben muß. Denn der Strom wird hervorgebracht durch die äußere elektromotorische Kraft und durch die Spannung des Kondensators; gegen die Summe dieser beiden ist er ohne Phasenunterschied,

gegen die erstere allein hat er also einen Phasenunterschied. Ein Kondensator bringt also ebenso wie eine induktive Rolle (S. 254) eine Phasenverschiebung des Stroms gegen die äußere elektromotorische Kraft hervor.

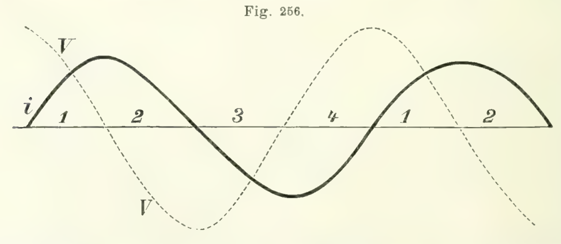
Vergleicht man aber das Zusammenwirken einer äußeren (periodischen) elektromotorischen Kraft einmal mit der des Extrastromes einer Induktionsrolle und dann mit der Spannung eines Kondensators, so findet man bei großer Ähnlichkeit doch einen wesentlichen Unterschied. Für Extraströme stellt in Fig. 255 die mit i bezeichnete krumme Linie

Fig. 255.



den in einer Leitung fließenden periodischen Strom dar, während die punktierte, mit S bezeichnete Linie die elektromotorische Kraft des Extrastromes einer Induktionsrolle in diesem Stromkreis darstellt. Teilt man die ganze Periode in 4 Viertel, wie es in der Figur durch die Zahlen 1, 2, 3, 4 angedeutet ist, so sieht man, daß im ersten und dritten Viertel beide Kurven in gleicher Richtung verlaufen (in 1 nach oben, in 3 nach unten), während sie im zweiten und vierten in entgegengesetzten Richtungen gehen. Dagegen stellt für einen Kondensator in Fig. 256

Fig. 256.

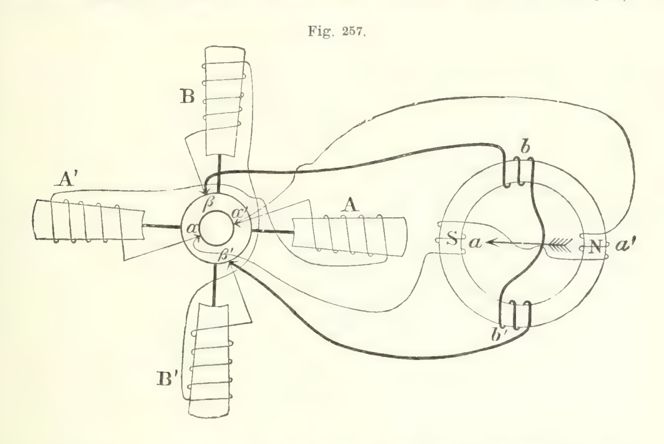


wieder die mit i bezeichnete Linie den Strom dar, die punktierte, mit V bezeichnete Linie aber die Spannung des Kondensators. Diese haben im zweiten und vierten Viertel gleiche, im ersten und dritten entgegengesetzte Richtung. Daraus sieht man, daß eine Selbstinduktionsrolle und ein Kondensator eine entgegengesetzte Wirkung auf die Phasenverschiebung haben. Während die Selbstinduktion, wie man sagt, den Strom verspätet gegenüber der elektromotorischen Kraft, hat eine Kapazität (ein Kondensator) im Stromkreis die Wirkung, ihn zu verfrühen. Daraus folgt, daß man die Phasenverschiebung, die durch eine Selbstinduktion in einem Stromkreis entsteht, wird aufheben können, indem man noch einen

Kondensator in denselben einschaltet. Ein Stromkreis mit Selbstinduktion und Kapazität hat eine geringere Phasenverschiebung als ein solcher bloß mit Selbstinduktion oder bloß mit Kapazität, unter Umständen gar keine.

So unerfreulich kompliziert nun auch die Betrachtung von Wechselströmen infolge der Phasendifferenzen wird, so bringt doch andererseits gerade die Phasendifferenz verschiedener Wechselströme eine Wirkung hervor, die eine sehr große praktische Bedeutung erlangt hat. Wir wollen zwei Wechselströme mit einer Phasendifferenz von 90⁰ uns wieder so erzeugt denken, daß wir (Fig. 257) zwei Rollenpaare A A′ und B B′ nehmen, die, um 90⁰ gegeneinander verstellt, vor den Polen eines Hufeisenmagnets rotieren. Von den Enden $\alpha\,\alpha'$ des einen Rollenpaares A führen wir die Drähte so, daß sie einen feststehenden Ring aus weichem Eisen an zwei diametral gegenüberliegenden Stellen umwickeln, wie es die Figur bei a

Fig. 257.

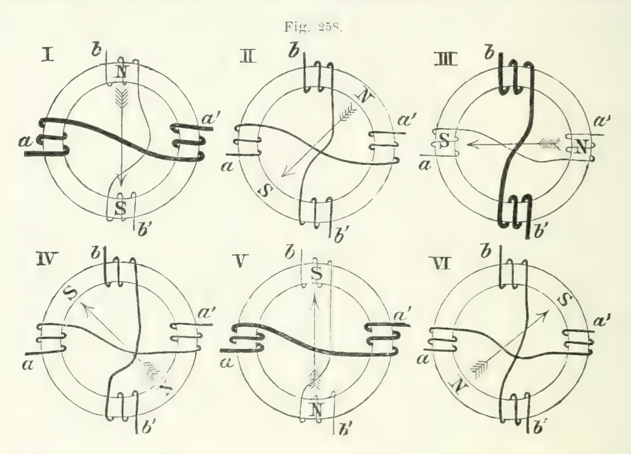


und a′ anzeigt. Auch von den Enden $\beta\,\beta'$ des anderen Rollenpaares wollen wir Drähte zu dem Ring führen, die ihn an zwei um 90⁰ von den ersten abstehenden Stellen bei b und b′ umwickeln. Wenn nun die Wechselströme in den beiden Leitungen fließen, so hat vermöge des Phasenunterschiedes der eine Strom in demselben Moment die größte Stärke, in dem der andere gerade die Stärke Null hat. In der Figur ist die verschiedene Stromstärke in den Umwindungen durch verschieden dicke Linien angedeutet. Man sieht den starken Strom bei b b′, den Strom Null bei a a′. Der Eisenring wird nun durch den Strom in b b′ magnetisiert, und zwar so, daß der Nordpol und Südpol an den Stellen N und S liegen, wie man sich durch die Ampèresche Schwimmerregel überzeugt. Eine Magnetnadel, die im Innern des Ringes sich auf einer Spitze drehen kann, wird also eine Lage annehmen, wie sie durch den großen Pfeil gezeichnet ist.

Wenn nun die Rollen A und B, die die Ströme erzeugen, sich drehen, dann erreichen abwechselnd die Ströme um a a′ und die um b b′, aber nicht gleichzeitig, ein Maximum, werden dann zu Null, bekommen dann

wieder einen maximalen, aber negativen Wert u. s. w. Dadurch aber verschieben sich auch die Pole des Ringes. Man erkennt das aus Fig. 258. In I ist der Strom a a′ stark, der Strom b b′ schwach, die Magnetnadel nimmt die gezeichnete Lage ein. Wenn die Rollen, welche die Ströme erzeugen, sich um 45° gedreht haben, dann sind die Ströme in a a′ und in b b′ gleich stark, so wie es Fig. II zeigt, dann befinden sich die Pole des Eisenringes bei N und S, und die Magnetnadel bekommt die schiefe Lage. In der folgenden Figur ist der Strom b b′ im Maximum, der Strom a a′ gleich Null, die Pole im Ring haben sich also weiter gedreht nach N S und die Magnetnadel ist ihnen gefolgt. Und so geht das weiter. Man sieht als Resultat, daß, wenn die beiden Wechselströme von verschiedener

Fig. 258.

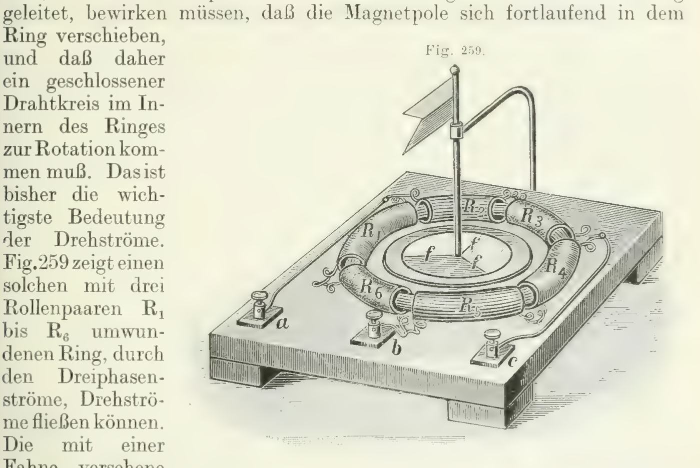


Phase durch die festen Windungen um den festen Ring geleitet werden, daß dann die Magnetnadel im Innern in fortlaufende Drehung kommen muß, daß sie sich so lange drehen muß, als die Ströme fließen. Statt der Magnetnadel können wir auch ein Stück weiches unmagnetisches Eisen in die Mitte bringen. Dies wird dann erst durch magnetische Induktion magnetisch und muß sich ebenso drehen. Ja, auch wenn man einen geschlossenen Drahtkreis, der sich um die Achse drehen kann, hineinbringt, so muß auch dieser sich drehen. Denn es werden in ihm Induktionsströme erzeugt, und diese Ströme, also der ganze Drahtkreis, werden von den wandernden Polen angezogen. Ebenso muß eine Metallscheibe im Innern des Rings in Rotation kommen, da in ihr Foucaultsche Ströme erzeugt werden, die den wandernden Polen nachwandern. Diese Erscheinung ist von großer Wichtigkeit geworden, da sie gestattet, durch Wechselströme Drehungen hervorzubringen und dadurch Arbeit zu leisten. Auf ihr beruhen die sogenannten Induktionsmotoren, die wir im zweiten Abschnitt besprechen werden.

Ein solches System von mehreren Wechselströmen, deren Phasen verschieden sind, hat also wichtige Eigenschaften, welche gerade von

dem Phasenunterschied abhängen. Man nennt solche zusammenwirkende Wechselströme Mehrphasenströme. Hat man zwei Rollenpaare, deren Phasenunterschied $90^0 \left(\frac{180^0}{2}\right)$ ist, so erzeugen diese Zweiphasenströme, drei Rollenpaare, deren Phasenunterschied je gleich $60^0 \left(\frac{180^0}{3}\right)$ ist, erzeugen Dreiphasenströme, vier Rollenpaare, mit dem Phasenunterschied $45^0 \left(\frac{180^0}{4}\right)$, würden Vierphasenströme erzeugen u. s. w. Dem dreiphasigen Wechselstrom, der am meisten benutzt wird, gibt man auch den kurzen Namen Drehstrom. In jedem Fall erkennt man, daß solche Mehrphasenströme, zweckmäßig um einen eisernen Ring geleitet, bewirken müssen, daß die Magnetpole sich fortlaufend in dem Ring verschieben, und daß daher ein geschlossener Drahtkreis im Innern des Ringes zur Rotation kommen muß. Das ist bisher die wichtigste Bedeutung der Drehströme. Fig. 259 zeigt einen solchen mit drei Rollenpaaren R_1 bis R_6 umwundenen Ring, durch den Dreiphasenströme, Drehströme fließen können. Die mit einer Fahne versehene Scheibe f f f, die im Innern drehbar aufgesetzt ist, kommt dabei in rasche Rotation.

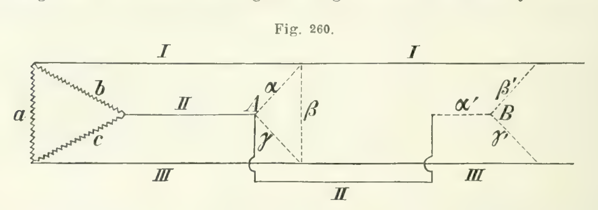
Fig. 259.



Hat man nun drei Rollen oder Rollenpaare, in denen Wechselströme von verschiedener Phase — die um 60^0 gegeneinander verschoben sind — erzeugt werden, so braucht man zunächst für jede der Rollen oder für jedes Rollenpaar 2 Leitungen, um die Ströme nach außen und wieder zurückzuführen, im ganzen also 6 Leitungen. Man kann aber, und das ist praktisch von großer Bedeutung, diese Rollen noch in verschiedener Weise untereinander verbinden. Dann erhält man verkettete Drehströme, deren Verhalten zwar kompliziert aussieht, aber nicht kompliziert ist. Es seien (Fig. 260) a b c drei Rollen, in denen Drehströme erzeugt werden. Sie haben je 60^0 Phasenunterschied gegeneinander, so daß, wenn in a die Phase Null ist, in b die Phase 60^0, in c die Phase 120^0 herrscht. Dann kann man die drei Rollen so verbinden, wie es die Fig. 260 angibt. Man sagt dann, die Rollen seien in Dreieckschaltung. Man kann aber auch die drei Rollen so verbinden, wie

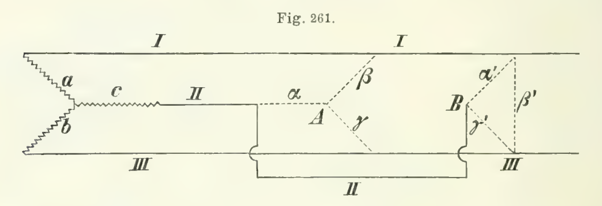
in Fig. 261, dann sagt man, sie seien in Sternschaltung. Man kann nun sowohl in der ersten, wie in der zweiten Figur von den drei Eckpunkten die Leitungen I, II, III fortführen und diese an irgend welchen Stellen wieder untereinander verbinden, und zwar auch wieder in Dreieckschaltung oder in Sternschaltung. In Fig. 260 und 261 sind jedesmal zwei

Fig. 260.



solche verschiedene Verbindungen gezeichnet. Fig. 260 zeigt die drei Rollen a b c in Dreieckschaltung, die drei Leitungen I, II, III aber sind bei A in Dreieckschaltung durch $\alpha\ \beta\ \gamma$, bei B in Sternschaltung durch $\alpha'\ \beta'\ \gamma'$ verbunden. Fig. 261 zeigt die drei Rollen a b c in Sternschaltung, und die Leitungen sind bei A in Sternschaltung durch $\alpha\ \beta\ \gamma$, bei B in Dreieck-

Fig. 261.



schaltung durch $\alpha'\ \beta'\ \gamma'$ verbunden. In jeder der drei Leitungen fließt dann ein Wechselstrom, und man erkennt, daß in jeder der Verbindungsleitungen $\alpha\ \beta\ \gamma$ oder $\alpha'\ \beta'\ \gamma'$ der Strom eine andere Phase haben muß, so daß also in diesen Verbindungsleitungen Drehstromwirkungen auftreten werden, trotzdem die Rollen verkettet sind. In dem Apparat Fig. 259 sind die Rollenpaare in Dreieckschaltung verbunden.

Das Auftreten dieser Phasenunterschiede als neues Element bei elektrischen Wechselströmen kompliziert zwar die Betrachtungen, aber man sieht ein, daß dadurch die Wechselströme in vielfältigere Kombinationen gebracht werden können als die Gleichströme. Darauf gerade beruht die Bedeutung der Wechselströme für die Wissenschaft und die Praxis, und es hat sich gezeigt, daß die Wechselströme, die lange Zeit wissenschaftlich und praktisch kaum beachtet wurden, an Bedeutung fortwährend gewachsen sind und für die Theorie der Elektrizität wie für ihre Anwendungen sich noch fruchtbarer erweisen als die Gleichströme.

11. Kapitel.

Die elektrischen Schwingungen.

Obwohl es durch die neueren Unterbrecher, den Turbinen- und den elektrolytischen Unterbrecher, möglich ist, einen Strom auf einfache Weise ein- bis zweitausendmal in der Sekunde zu unterbrechen und dadurch in einer Induktionsspule Wechselströme mit der Frequenz 1000 bis 2000 pro Sekunde zu erzeugen, so sind doch diese Wechsel nur äußerst langsam gegen diejenigen, welche, wie man allmählich erkannt hat, die Natur selbst durch einfache Mittel erzeugt. In Wirklichkeit kommen bei unseren Experimenten, ohne daß wir etwas dazu tun, wechselnde elektrische Ströme vor, die in jeder Sekunde 100 000mal, millionenmal, ja sogar milliardenmal ihre Richtung ändern. Solche außerordentlich rasch wechselnde elektrische Bewegungen nennt man elektrische Schwingungen oder Oszillationen, und das Mittel, durch welches sie entstehen, ist eine der am längsten bekannten, aber lange Zeit nicht genügend erkannten elektrischen Erscheinungen, nämlich der elektrische Funke.

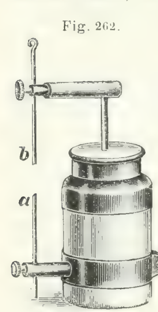
Wenn man eine Leydener Flasche durch einen elektrischen Funken entladet, oder wenn man zwischen den Enden einer Induktionsspule einen Funken übergehen läßt, so erhält man jedesmal elektrische Schwingungen. Die Perioden dieser Schwingungen sind außerordentlich klein, sie variieren je nach der Kapazität der Leiter, zwischen denen der Funke übergeht, von dem zehntausendsten bis zum hundertmillionsten, ja sogar tausendmillionsten Teil einer Sekunde. In allen Fällen aber ist es der elektrische Funke, welcher den Anlaß zu elektrischen Schwingungen gibt. Das ist eine besondere und unvorhergesehene Eigenschaft des elektrischen Funkens, aber wir können leicht erkennen, wieso er dieses tut. Der wesentliche Grund zur Entstehung solcher Oszillationen ist nämlich das Auftreten von Extraströmen bei der Entladung durch einen Funken.

Wir wollen, um dieses einzusehen, die Entladung eines Kondensators oder einer Leydener Flasche genauer betrachten.

Wenn eine Leydener Flasche geladen ist, so befindet sich auf der einen Belegung, etwa der inneren, positive Elektrizität, auf der anderen negative Elektrizität, und zwar auf jeder gleich viel, eine gewisse Zahl Coulomb. Wird nun die innere Belegung mit der äußeren durch einen Leiter verbunden, indem man etwa, wie in Fig. 262, jede der beiden Belegungen in einen verschiebbaren Draht ausgehen läßt und die Drähte einander nähert, so springt ein Funke zwischen den Leitern bereits über, bevor sie noch zur Berührung gekommen sind, und die Flasche wird entladen. Durch die Leiter und diesen Funken geht also die Entladung vor sich, fließt die Elektrizität. Der ganze Vorgang geschieht zwar in sehr

kurzer Zeit, aber man kann doch verfolgen, wie sich in dieser kurzen Zeit die Verhältnisse gestalten. Auf den beiden Belegungen der Flasche ist zunächst eine bestimmte Spannungsdifferenz vorhanden (bei unserer Annahme ist die Spannung von b größer als die von a), und diese treibt nach dem Ohmschen Gesetz die Elektrizität durch die Drähte und die Luft. Durch diesen Übergang nimmt aber zugleich die Menge der Elektrizität auf jeder der beiden Belegungen ab, da sie sich eben durch den Strom ausgleichen, und daher wird die Spannungsdifferenz auf beiden Belegungen sofort in den aufeinander folgenden Abschnitten der kurzen Zeit während der Entladung immer geringer, und deswegen nimmt auch die Stromstärke rasch, in äußerst kurzer Zeit, von einem größten Werte an, ab. Da nun aber bei jeder Veränderung der Stromstärke in einem Leiter Extraströme auftreten, so müssen also auch hierbei die Extraströme wirksam sein. Im ersten Moment, wo der Entladungsstrom anfängt, beginnt auch der Extrastrom, welcher die entgegengesetzte Richtung hat wie dieser. Der Entladungsstrom geht von der Belegung b nach a, dann geht dieser Extrastrom von a nach b. Der eigentliche Entladungsstrom wird nun rasch so schwach, daß dieser Extrastrom überwiegt. Daher bewegt sich im ersten Moment die Elektrizität von b nach a, gleich darauf aber von a nach b. Der Extrastrom nimmt aber ebenfalls an Stärke sofort ab und es entsteht ein neuer Extrastrom, welcher nun wieder von b nach a gerichtet ist und in einem folgenden Moment den ersten Extrastrom überwindet, so daß sich nun die Elektrizität wieder von b nach a bewegt und so fort. Man erhält also tatsächlich das merkwürdige Resultat, daß der Entladungsstrom nicht, wie man eigentlich glauben sollte, direkt von b nach a geht, sondern daß er, gerade wegen der Wirkung der Extraströme, abwechselnd von b nach a, dann von a nach b, dann wieder von b nach a geht u. s. w.

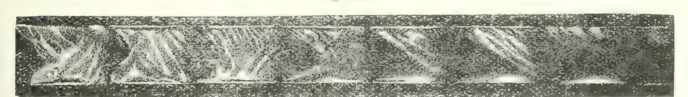
Fig. 262.



Kurz, man erhält eine oszillierende Entladung, man erhält elektrische Schwingungen. Damit diese aber eintreten können, müssen die jedesmaligen Extraströme stark genug sein, um die vorhergehenden Ströme zu überwinden, d. h. die oszillatorische Entladung kann nur eintreten, wenn das Selbstpotential der Leitung, durch welches ja die Extraströme bedingt werden, mindestens einen bestimmten Wert hat, welcher in Beziehung zu der Kapazität der Leydener Flasche und dem Widerstand der ganzen Leitung steht. Ist diese Bedingung aber erfüllt, so entladet sich eine Flasche oder ein Kondensator tatsächlich oszillatorisch. In bestimmten aufeinander folgenden Zeiten, die allerdings sehr nahe bei einander liegen, kehrt sich die Richtung des Stromes zwischen den beiden Belegungen um. Die Zeit, die zwischen einer Umkehrung des Stromes und der folgenden verfließt, nennt man die Periode der elektrischen Schwingungen. Daß in der Tat solche Oszillationen bei der Entladung einer Leydener Flasche auftreten, hat zum ersten Male Feddersen beobachtet, und er hat zugleich die Periode dieser Oszillationen gemessen. Er stellte nämlich derjenigen Stelle gegenüber, an welcher der Funke entstehen sollte, einen

Spiegel auf, der sehr rasch um seine Achse gedreht wurde, einen sogenannten Drehspiegel. In der kurzen Zeit, die der Funke andauert, dreht sich dann der Spiegel um einen Winkel, der um so größer ist, je größer die Drehungsgeschwindigkeit ist. Da nun ein Spiegel einen Lichtstrahl immer unter demselben Winkel zurückwirft, unter dem er aufgefallen ist, so ist klar, daß man das von dem Spiegel reflektierte Bild des Funkens dabei zu einem Bande, einem Lichtbande ausgezogen zu sehen erwarten mußte. Das war auch tatsächlich der Fall, aber mit einer unvorhergesehenen Modifikation. Es ergab sich nämlich, daß das Bild das Aussehen hatte wie in Fig. 263. Man sieht, daß in dem Lichtband (das photographiert wurde) eine Reihe von dunklen Stellen mit hellen Zwischenräumen vorhanden ist, ein Beweis dafür, daß die Entladung periodisch aussetzt und wieder beginnt, also daß in der Entladung Oszillationen vorhanden sind. Es gelang auch Feddersen leicht, aus einem solchen Bilde die Periode dieser Oszillationen zu messen. Wenn man nämlich die Umdrehungsgeschwindigkeit des Spiegels und den Abstand der photographischen Platte vom Spiegel kennt, so kann man aus der Länge des ganzen Lichtbandes die Dauer des ganzen Funkens berechnen. Ist z. B.

Fig. 263.



der Abstand der photographischen Platte vom Spiegel 1 m und würde der Funke eine Sekunde lang dauern, so würde das Bild des Funkens, wenn der Spiegel sich in dieser Sekunde 100mal vollständig herumdreht, einen Lichtstreifen darstellen, der 200mal einen Kreis von 1 m Radius umfaßt. Da nämlich das auffallende Licht vom Spiegel immer unter demselben Winkel zurückgeworfen wird, unter dem es auffällt, so wandert das Bild, das der Spiegel entwirft, doppelt so rasch als der Spiegel. Dauert nun der ganze Funke nicht eine Sekunde, sondern etwa $^1/_{10000}$ Sekunde, so hat das Lichtband auch bloß den zehntausendsten Teil der Länge (in unserem Beispiel ist im ersten Fall die Länge angenähert $6 \times 200 = 1200$ m, im zweiten Fall angenähert 0,12 m = 12 cm). So kann man umgekehrt aus der Länge des Lichtbandes die Dauer des ganzen Funkens berechnen. Bei der obigen Figur betrug nun die Dauer des ganzen Funkens etwa $^1/_{60000}$ Sekunde. Da nun in dem Funken 8 Schwingungen vorhanden sind, 8mal weiße Stellen mit schwarzen abwechseln, wie man durch Abzählen erkennt, so beträgt die Dauer einer Oszillation etwa den 500 000sten Teil einer Sekunde. In so kurzer Zeit bewegt sich bei diesen Entladungen von Leydener Flaschen die Elektrizität hin und her. Kirchhoff hat dann aus theoretischen Betrachtungen gelehrt, die Periode dieser Oszillationen zu berechnen. Sie hängt nämlich in einfacher Weise von der Kapazität des Kondensators und dem Selbstpotential der angewendeten Leitung ab, und zwar wird die Periode (genauer: ihr Quadrat) um so größer, je größer die Kapazität der Flasche und je größer das Selbstpotential der Leitung ist.

Ebensolche oszillatorische Entladungen treten, wie gesagt — und zwar aus demselben Grunde — auch bei Induktionsapparaten ein, wenn zwischen deren sekundären Polen Funken überspringen. Nur haben dabei, da das Selbstpotential der Induktionsapparate ein außerordentlich großes ist, die Entladungen eine viel größere Periode. Etwa in dem 10 000sten Teil einer Sekunde geht bei solchen geöffneten Induktionsapparaten die Entladung einmal hin und her.

Daß bei der Entladung durch einen Funken solche periodische Bewegungen entstehen, konnte man allerdings nicht vorhersehen. Nachdem aber die Tatsache einmal konstatiert ist, läßt sie sich auch mechanisch leicht begreifen.

Eine Luftstrecke setzt elektrischen Spannungen im allgemeinen einen solchen Widerstand entgegen, daß sie ihn nicht überwinden können. Wir müssen annehmen, daß der Äther, welcher sich in der Luft befindet, im allgemeinen nicht nachgiebig ist, daß die Elektronen in ihm einen großen Widerstand gegen ihre Bewegung finden und daß darauf die isolierende Eigenschaft der Luft oder anderer Isolatoren beruht. Wenn aber die Spannungen so groß werden, daß der Funke zwischen zwei Leitern überspringt, so findet ein Durchbrechen dieses Widerstandes statt, der Widerstand wird gewaltsam überwunden. Jede Überwindung eines elastischen Widerstandes in der Natur findet aber p e r i o d i s c h statt. Wenn wir z. B. bloß Luft aus der gespitzten Mundhöhle hinausblasen, so hören wir einen Ton, und da Töne immer auf periodischen Bewegungen beruhen, so beweist das, daß diese Überwindung des Widerstands periodisch vor sich gegangen ist. Ebenso hören wir bei jedem Zerreißen, Zerbrechen, Zerdrücken von Körpern, bei jedem Schritt, den wir auf der Straße machen, einen Ton, haben also überall eine periodische Bewegung erzeugt. Ganz so wird nun auch der Widerstand der isolierenden Luftschicht, wenn er durchbrochen wird, periodisch überwunden, die Elektronen schwanken, wie die Luftteilchen bei einem Tone, hin und her, und zwar in sehr kurzer Zeit. Es entstehen daher durch einen solchen Funken in der Luft und in den Drähten, zwischen denen der Funke übergeht, elektrische Schwingungen.

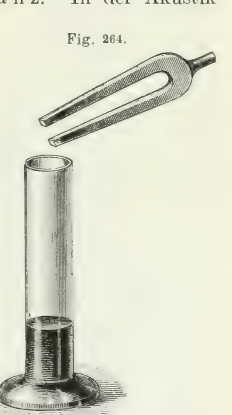
Ebenso wie eine Pfeife um so raschere Schwingungen macht, um so höhere Töne gibt, je kürzer sie ist, je geringer also die in Bewegung versetzte Luftmenge ist, ebenso sind auch bei der Funkenentladung die Schwingungen um so rascher, ist die Schwingungsdauer um so kürzer, je geringer die in Bewegung versetzten Elektrizitätsmengen sind. Große Leydener Flaschen geben daher, wenn sie durch einen Funken entladen werden, langsamere Schwingungen als kleine, und die raschesten Schwingungen erhält man demnach, wenn man zwischen Körpern von sehr geringer Kapazität Funken übergehen läßt. Daß aber außer der Kapazität des Kondensators noch das Selbstpotential der Leiter von Einfluß auf die Schwingungsdauer ist, hat ebenfalls ein Analogon bei den Schallschwingungen. Auch dort spielt die F o r m des Instrumentes eine wesentliche Rolle, gerade wie hier die Form der Drähte. Gerade Trompeten haben bei gleicher Länge einen anderen Ton als solche mit vielen Windungen.

Daß solche elektrische Schwingungen in einem Leitersystem auftreten, in welchem irgendwo ein Funke übergeht, ist nun zwar aus den

oben angeführten Beobachtungen von Feddersen erschlossen worden und wird durch das Funkenbild bewiesen, immerhin aber wird man zunächst verlangen müssen, daß sich diese Schwingungen auch wirklich als solche manifestieren, daß sie Eigenschaften zeigen, welche allen schwingenden Bewegungen zukommen. Wir kennen in der Natur außer den sichtbaren Schwingungen von Pendeln oder von Wassermassen noch andere Erscheinungen, die sicherlich auf Schwingungen beruhen, nämlich den Schall und das Licht, und wir kennen bei diesen eine Reihe von merkwürdigen und interessanten Phänomenen, welche direkt auf ihrer Schwingungsnatur beruhen. Es lassen sich nun in der Tat ganz analoge Erscheinungen, wie sie uns beim Schall und beim Licht bekannt sind, auch mit den elektrischen Schwingungen hervorbringen.

Eines der wichtigsten und interessantesten Phänomene, welches die Schallschwingungen zeigen, und welches gerade auf ihrer Schwingungsnatur beruht, ist die Erscheinung der Resonanz. In der Akustik ist es bekannt, daß man durch den Ton eines Instrumentes, einer Pfeife, einer Stimmgabel, einer Glocke oder dergl. ein anderes Instrument zum lauten Tönen anregen kann, wenn der Ton des anregenden Instrumentes mit dem Eigenton des angeregten übereinstimmt. Man sagt dann eben, das angeregte Instrument tönt durch Resonanz. Man kann diese Erscheinung am leichtesten und deutlichsten zeigen, wenn man Luftsäulen zur Resonanz bringt. Man nimmt zu dem Zweck, wie in Fig. 264, ein hohes Glasgefäß, das man zum Teil mit Wasser füllt, so daß über dem Wasser eine Luftsäule von beliebig zu bestimmender Höhe bleibt. Eine solche Luftsäule kommt nun zum kräftigen Tönen, sobald man an die Öffnung des Glases eine angeschlagene Stimmgabel hält, die gerade den passenden Ton hat, nämlich denjenigen, den die Luftsäule vermöge ihrer Länge, wenn sie zum Schwingen gebracht wird, selbst erzeugt. Bei einer Reihe von Stimmgabeln wird gerade diejenige eine Verstärkung ihres Tones erfahren, auf welche die Länge der Luftsäule abgestimmt ist. Macht man durch Zugießen von Wasser die Luftsäule kürzer, so wird eine Stimmgabel mit höherem Ton die Resonanz anregen; macht man die Luftsäule länger, so wird es eine tiefere Stimmgabel sein, die anregend wirkt. Die Bedingung für das starke Mittönen, für die Resonanz ist immer die, daß der Eigenton des Resonators übereinstimmt mit dem Ton des anregenden Instrumentes, also auch die Periode des Resonators übereinstimmt mit der Periode des anregenden Instruments. Diese Eigenschaft der Resonanz ist nun nicht an den Schall gebunden, sondern sie hängt von der Schwingungsnatur des Schalls ab, sie muß sich also bei anderen Schwingungen auch hervorbringen lassen. Auf das Gebiet elektrischer Schwingungen übertragen, werden wir also erwarten müssen, daß ein Drahtsystem, welches Selbstpotential und Kapazität besitzt, nicht bloß

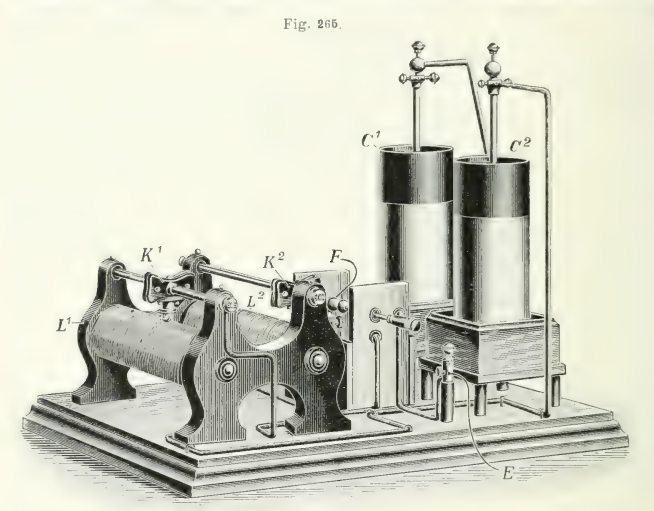
Fig. 264.



durch einen Funken in elektrische Schwingungen versetzt werden kann, sondern auch dadurch, daß es angeregt wird von Schwingungen derselben Periode, die von einem anderen elektrisch schwingenden System herrühren.

Um von den in Frage kommenden Verhältnissen in möglichster Kürze und Schärfe sprechen zu können, wollen wir die beiden Systeme, in welchen elektrische Schwingungen stattfinden, als Schwingungskreise bezeichnen und zwar den einen als den anregenden, den anderen als den resonierenden oder mitschwingenden. Diese beiden müssen so zu einander liegen, daß eben die Schwingungen in dem zweiten durch

Fig. 265.

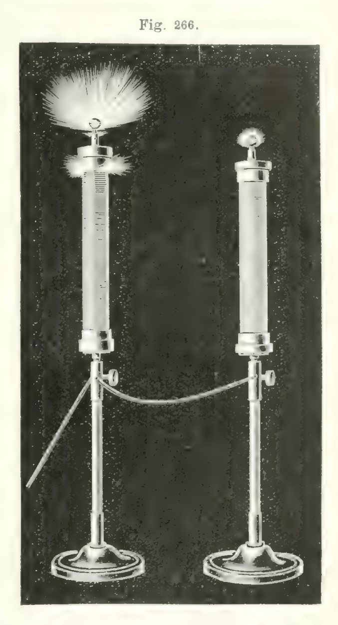


den ersten angeregt werden können. Ein Mittel dazu ist dasjenige, daß man den resonierenden Kreis in die Nähe des anregenden bringt, so daß durch Induktionswirkung die elektrischen Schwingungen in ihm entstehen. Man sagt dann, die beiden Schwingungskreise sind miteinander induktiv gekoppelt.

Man kann aber außer der induktiven Verbindung der beiden Schwingungskreise auch eine direkte, durch einen Draht, zwischen ihnen herstellen, und dann nennt man die beiden Kreise galvanisch oder direkt gekoppelt. Hierbei wird ebenfalls der resonierende Schwingungskreis durch die in regelmäßigem Tempo ankommenden Schwingungen des anderen zu Eigenschwingungen angeregt, wenn seine Eigenschwingungsdauer mit der des anregenden Kreises übereinstimmt. Solche direkte Koppelung ist nun gerade bei den hübschen Resonanzversuchen angewendet, die von Seibt angegeben worden sind. Der anregende Schwingungskreis ist in Fig. 265 gezeichnet. Er besteht aus einem Paar Leydener Flaschen $C^1 C^2$, welche die Kapazität, ferner aus aufgewickelten blanken

Drähten $L^1 L^2$, welche das Selbstpotential desselben im wesentlichen bestimmen, und von welchen letzteren durch die Schieber $K^1 K^2$ mehr oder weniger Windungen eingeschaltet werden können, und endlich aus einer Funkenstrecke F. Der resonierende Schwingungskreis besteht einfach aus einer Drahtspule, oder auch aus zwei parallel geschalteten ähnlichen Drahtspulen von verschiedener Dicke und Windungszahl, wie sie Fig. 266 zeigt. Eine solche Drahtspule hat nämlich ein gewisses Selbstpotential, wie alle Drähte, aber sie hat auch eine gewisse Kapazität. Zwischen je zwei Windungen befindet sich ja immer die isolierende Umspinnung und da in dem Draht ein Spannungsverlust stattfindet, so stellen zwei aufeinanderfolgende Windungen zwei Leiter von verschiedener Spannung dar, die zwischen sich ein isolierendes Medium haben, sie bilden also einen Kondensator. Da das bei allen Windungen der Fall ist, so besitzt eine solche Drahtspule schon von selbst, auch ohne Anwendung eines besonderen Kondensators, eine gewisse Kapazität. Die Verbindung der beiden Schwingungskreise geschieht nun durch galvanische Koppelung und in Fig. 267 ist das Schema der zusammengekoppelten beiden Kreise gezeichnet. Durch einen Induktionsapparat J werden in dem primären Schwingungskreis Funken erregt, die nun zu Oszillationen Veranlassung geben. Durch den Induktionsapparat werden nämlich die Leydener Flaschen C_1 C_2 geladen, bis ein Funke bei F überspringt. Dieser erzeugt in dem ganzen Kreis (F, C_1 C_2, variable Selbstinduktion K_1 K_2, E) die raschen Oszillationen. An den Punkt P ist nun der resonierende Schwingungskreis, die Spule R angeschlossen oder es sind, wie in der Figur, zwei oder mehr solche Spulen R und R′, parallel geschaltet, angeschlossen. Der Punkt E wird zur Erde abgeleitet, so daß er das Potential Null bekommt.

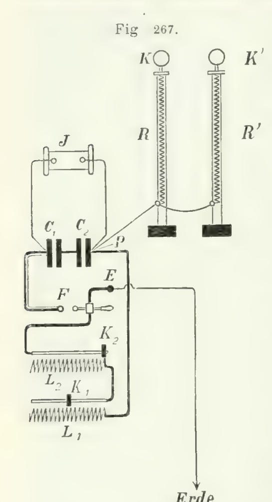
Fig. 266.



Durch die in dem anregenden Schwingungskreise stattfindenden Oszillationen werden nun die gekoppelten Spulen angeregt, und zwar dann, wenn ihre Eigenschwingung mit der des anregenden Kreises übereinstimmt. Die letztere kann man aber durch die variable Selbstinduktion L_1 L_2 in ziemlich erheblichen Grenzen ändern. Koppelt man also z. B. die beiden Spulen von Fig. 266 an P an und erregt man den primären Schwingungskreis durch den Induktionsapparat, wobei man erst die Selbstinduktion L_1 L_2 ganz ausschaltet, so hat man sehr hohe Schwingungszahlen, auf welche die beiden Spulen nicht reagieren. Schaltet man aber mehr und

mehr Selbstinduktion ein, so wird die Periode der primären Schwingungen größer, die Zahl ihrer Schwingungen pro Sekunde kleiner, und man kommt so zu einem Punkt, wo die eine der beiden Spulen erheblich angeregt wird. Man erkennt das daran, daß aus ihrem oberen Ende starke bläuliche Funken ausspritzen, wie es an der einen Spule in der Fig. 266 gezeichnet ist. Der primäre Schwingungskreis ist jetzt in Resonanz mit dieser Spule, während die andere ruhig ist. Vergrößert man die Selbstinduktion L_1 L_2 weiter, so hört die eben spritzende Spule auf, Funken zu sprühen, die Resonanz ist nicht mehr vorhanden und man kommt nach allmählichem weiteren Hinzufügen von Selbstinduktion zu einem Punkt, wo die zweite Spule anfängt zu sprühen. Man findet, daß das stärkste Funkensprühen sich sehr scharf markiert, kleine Verschiebungen des Schiebers auf L_1 L_2 genügen, um dasselbe hervorzubringen oder zu unterdrücken. Auf diese Weise läßt sich also die Resonanz der Spulen mit dem anregenden Schwingungskreis deutlich erkennbar machen, sie ist ebenso deutlich, wie in der Akustik das Mitschwingen einer abgestimmten Luftmasse mit einer angeschlagenen Stimmgabel. An dem freien Ende einer solchen galvanisch gekoppelten Spule ist immer ein Maximum der Spannung vorhanden, ein sogenannter Spannungsbauch, weil eben dort die Elektrizität nicht abströmen kann. Gerade deswegen sprüht die Spule, weil durch die starke Spannung der Widerstand der Luft überwunden wird.

Fig. 267.



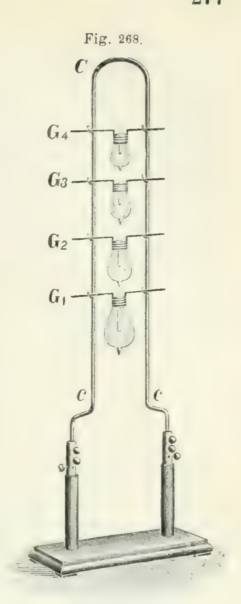
Dieses Experiment beweist uns deutlich das Vorhandensein von elektrischen Schwingungen sowohl im anregenden System, wie in den resonierenden Spulen. Wir sind also jetzt sicher, daß wir ein System, das Kapazität und Selbstinduktion besitzt, zu elektrischen Schwingungen veranlassen können, zu rasch hin und her gehenden elektrischen Bewegungen.

Wenn wir solche rasch wechselnde elektrische Bewegungen, solche sehr rasche Wechselströme, durch einen Draht hindurchgehen lassen, so kommt es, wie wir wissen, dabei nicht auf den gewöhnlichen Ohmschen Widerstand des Drahtes an, sondern auf seine Impedanz (oben S. 248). Je größer die Frequenz der Wechselströme ist, um so mehr überwiegt der Einfluß der Selbstinduktion eines Drahtes den gewöhnlichen Widerstand desselben. Daher kommt es, daß, wenn man solche rasche Schwingungen durch ein verzweigtes Leitersystem gehen läßt, man zum Teil ganz andere Vorgänge erhält, als wenn man Gleichströme oder langsam wechselnde Wechselströme durch dasselbe gehen ließe.

Infolge der raschen Änderungen des Stromes werden auch die Extraströme sehr stark, und wenn das Selbstpotential des Drahtes, durch welchen die Ströme gehen sollen, einigermaßen groß ist, so schwächen die Extraströme den Strom so bedeutend, daß er überhaupt nicht durch den Draht

gehen kann. Die Oszillationen gehen leichter durch einen dünnen Kohlenfaden von 1 cm Länge, als durch einen dicken Kupferdraht von 2 cm Länge, eben weil das Selbstpotential, das der 2 cm lange Kupferdraht besitzt, größer ist, als das des Kohlenfadens von 1 cm, während der Widerstand des Kohlenfadens viele tausend Mal größer sein kann, als der des Kupferdrahtes.

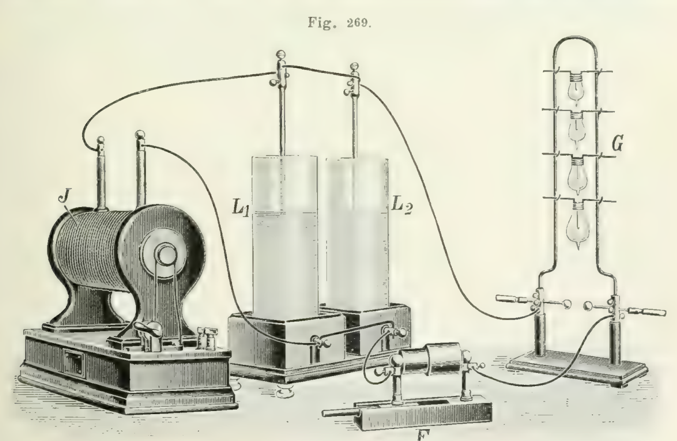
Fig. 268.



Auf diesem Grunde beruht folgendes interessante Experiment. Wenn man, wie in Fig. 268, einen dicken Kupferstreifen C nimmt und parallel zu ihm eine Reihe kleiner Glühlampen G_1, G_2, G_3, G_4 schaltet, und wenn man durch dieses System elektrische Schwingungen sendet, so leuchten die Glühlampen auf. Ein konstanter Strom oder ein Strom mit geringerer Frequenz würde nur durch den dicken Kupferstreifen und bloß zu einem ganz minimalen Bruchteil durch den Kohlenfaden der Glühlampen gehen, da diese ja sehr viel größeren Widerstand haben, während die raschen Oszillationen hauptsächlich durch die Glühlampen gehen, weil diese eben (wegen der geringeren Länge des Fadens) geringeres Selbstpotential haben als der Kupferstreifen.

Eine Anordnung zu diesem Versuch, wie sie von Ernecke in Berlin ausgeführt wird und die auch für das folgende wichtig ist, zeigt Fig. 269. Die zwei Leydener Flaschen L_1 und L_2, die parallel oder hintereinander geschaltet

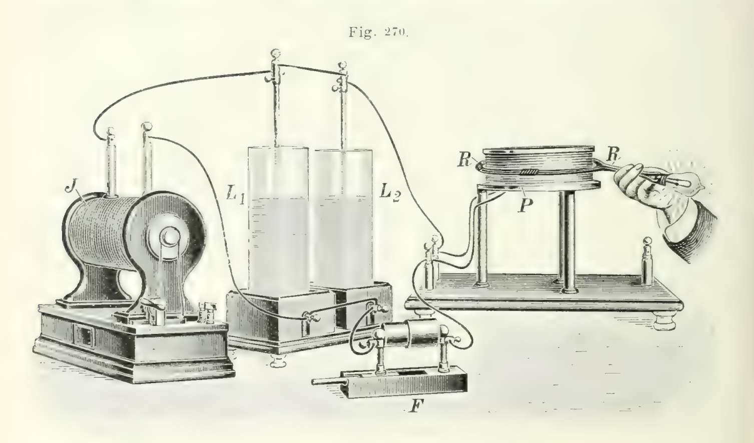
Fig. 269.



werden können, die Funkenstrecke F und das Gestell mit den Glühlampen G bilden den Schwingungskreis. Die Belegungen der Leydener Flaschen werden mit den Polen eines Induktionsapparates J verbunden. Die Funkenstrecke F besteht aus zwei gegeneinander verschiebbaren Zinkzylindern, welche, um das Licht des Funkens abzuhalten, in eine Ebonithülle eingeschlossen, verdeckt sind.

Wenn man solche raschen Schwingungen durch eine Drahtrolle gehen läßt, so zeigt diese kräftige Induktionswirkungen. Je rascher die Wechsel des Stromes in einem Draht sind, desto größer ist ja, wie wir wissen, unter sonst gleichen Umständen die Induktionswirkung. Diese ist daher hier sehr erheblich, was durch einen hübschen Versuch gezeigt werden kann. Wenn man (Fig. 270) wieder die Schwingungen erzeugt, indem man die Leydener Flaschen L_1 L_2 von einem Induktionsapparat J ladet und sie

Fig. 270.



durch eine Funkenstrecke F und die Drahtrolle P entladet, so hat man in P solche Schwingungen mit erheblicher Induktionswirkung. Hält man nun mit der Hand über der Rolle P einige Windungen R eines dicken Kupferdrahtes, die durch eine Glühlampe geschlossen sind, so kommt die Glühlampe zum Leuchten. Sie hat gar keine Verbindung mit einer Stromquelle, sondern wird bloß durch Induktion zum Leuchten gebracht.

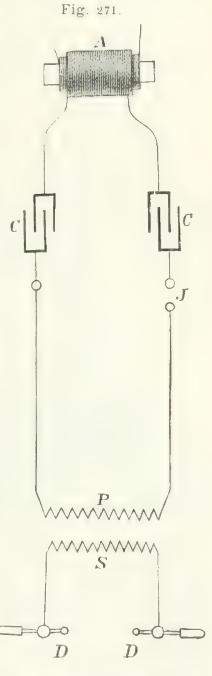
Diese starken Induktionswirkungen eines oszillierenden Kreises hat nun Tesla zur Hervorbringung sehr interessanter und merkwürdiger Phänomene benutzt. Er erzeugte nämlich bei seinen Versuchen rasche Schwingungen von sehr hoher Spannung und studierte die auffallenden Erscheinungen, die bei solchen sehr raschen Oszillationen mit hoher Spannung auftreten.

Um den elektrischen Schwingungen hohe Spannung zu erteilen, benutzte er das Prinzip der Transformation. Er erzeugte die elektrischen Schwingungen in einem Kreis, der durch Leydener Flaschen, eine

Funkenstrecke und durch eine (primäre) Spule von einigen Windungen dicken Drahtes gebildet wurde. Um die primäre Spule brachte er aber nun eine sekundäre Spule mit sehr vielen Windungen eines dünnen, vorzüglich isolierten Drahtes an. In dieser werden dann Induktionsströme erzeugt von derselben Schwingungszahl (Frequenz), aber von außerordentlich hoher Spannung, weil die Zahl der Windungen in der sekundären Spule groß ist und weil eben der primäre Strom in so sehr kurzer Zeit seine Stärke und Richtung ändert.

Diese Anordnung von Tesla ist in Fig. 271 schematisch gezeichnet. Durch einen großen Funkeninduktor A werden die Leydener Flaschen CC geladen, indem die Pole der sekundären Spule des Funkeninduktors mit den beiden inneren Belegungen der Flaschen verbunden werden. Die äußeren Belegungen (die entgegengesetzt geladen sind) sind durch eine Funkenstrecke J und die primäre Induktionsspule P miteinander verbunden. Die sekundäre Spule S ist dann diejenige, an deren Polen D D sehr hohe Spannungen mit sehr großer Frequenz auftreten. Die beiden Spulen P und S in dieser Anordnung bezeichnet man zweckmäßig als Teslatransformator.

Fig. 271.



Die primäre Induktionsspule P und die sekundäre Spule S müssen, wegen der hohen Spannungen, sehr sorgfältig voneinander isoliert werden. Das geschieht am besten dadurch, daß man die ganze Spule in ein Gefäß voll Paraffinöl stellt, das man durch Auspumpen sorgfältig von aller Luft befreit.

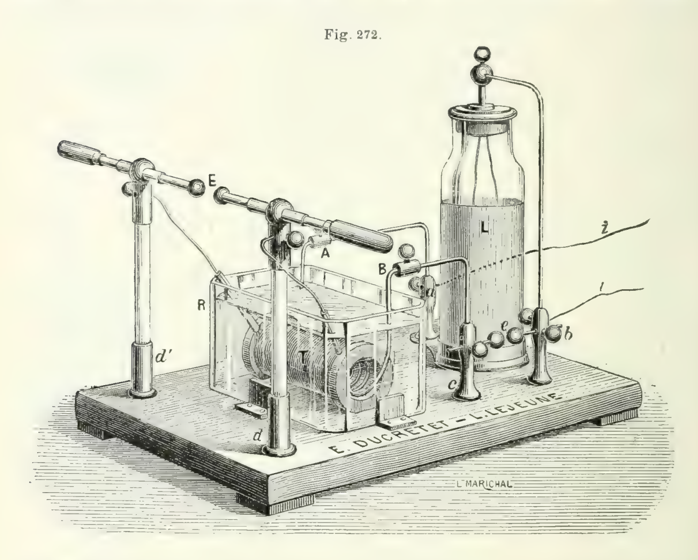
Eine Ansicht dieser Zusammenstellung für die Teslaschen Versuche zeigt Fig. 272. Man sieht die Leydener Flasche L, die von dem (nicht gezeichneten) Induktionsapparat vermittels der Drähte l und i geladen wird. Die Entladung der Flasche geht von der inneren Belegung bei b durch die Funkenstrecke e, dann durch die inneren (primären) Windungen des Teslatransformators T, welcher in dem ölgefüllten Gefäß R liegt, nach A und dann zur äußeren Belegung bei a. Die sekundäre Rolle des Transformators hat ihre Enden in den beiden auf Glasfüßen stehenden Kugeln E, die gegeneinander verschiebbar sind.

Die Induktionswirkungen dieser raschen Oszillationen sind übrigens so kräftig, daß man die sekundäre Rolle nicht durchaus so nahe an die primäre zu bringen braucht, wie es bei dieser Anordnung geschehen ist. Man kann auch, wie es in Fig. 273 zu sehen ist, die sekundäre Rolle S einfach in die Mitte einer weiteren primären Rolle P stellen und hat dann den Vorzug, daß der Luftzwischenraum zwischen beiden Rollen eine gute Isolierung bildet. Die sekundäre Rolle, aus vielen Windungen dünnen

Drahtes bestehend, befindet sich in einem Zylinder, der mit Paraffinöl gefüllt wird. Ihre beiden Pole sind bei s und E, die Pole der primären bei p_1 und p_2.

Die auffallendsten Erscheinungen nun, die diese sehr hochgespannten elektrischen Schwingungen bieten, sind Lichterscheinungen. Verbindet man den einen Pol der sekundären Rolle mit der Erde, so sprühen an der anderen senkrecht nach außen große blaue Lichtbüschel. Wenn man an die Pole der sekundären Spule s und E Drähte ansetzt und diese einander nähert und einen Luftstrom gegen den Zwischenraum bläst, so erhält man eine Flammenmenge zwischen den Polen, die aus dünnen und dicken

Fig. 272.

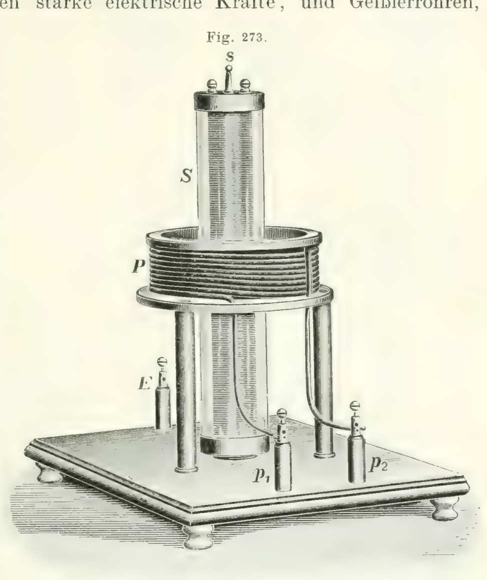


silberglänzenden Fäden besteht und gewissermaßen ein Netzwerk von elektrischen Funken darstellt.

Bringt man an einem der Pole einen langen Draht an, der am Ende isoliert ist, so schießen auch bei diesem auf der ganzen Länge desselben bläuliche Strahlen senkrecht zum Draht hervor. Legt man an beide Pole s und E je einen Draht und führt dieselben parallel zu einander in nicht zu großer Entfernung, so schießen die Strahlen von dem einen Draht zum anderen über und bilden ein langes, schmales, bläulich-weißes Lichtband. Man kann diesen Versuch vielfach variieren. Einen hübschen Anblick gewährt er in folgender Form, die in Fig. 274 dargestellt ist. Der eine Pol der sekundären Spule ist mit einem kleinen Drahtkreis, der andere mit einem größeren verbunden und die Strahlen gehen nun fast kontinuierlich zwischen den beiden Kreisen über und bilden einen leuchtenden Kegelstumpf.

Berührt man einen der sekundären Pole des Teslatransformators mit einer Geißlerschen Röhre (einer geschlossenen Röhre, in der die Luft sehr verdünnt ist), so leuchtet diese hell auf. Aber auch ohne direkte Berührung leuchten solche Röhren, wenn sie bloß in die Nähe der Pole gebracht werden. Die elektrische Bewegung strahlt eben von den Polen aus, geht durch den Äther hindurch und erregt die verdünnten Gase in Geißlerröhren. Wenn man zwei Metallplatten, am besten aus Metallnetzen gebildet, wie in Fig. 275, in $^1/_2$ bis 1 m Abstand voneinander aufstellt und jede mit einem Pol der Teslarolle verbindet, so herrschen in dem ganzen Raume zwischen ihnen starke elektrische Kräfte, und Geißlerröhren, die frei in diesen Raum gebracht werden, leuchten hell auf. Sie leuchten auch außerhalb der Metallschirme auf. Die ganze Umgebung ist eben von elektrischen Kräften durchflutet. Tesla hat auf diese Erscheinung die Hoffnung gegründet, eine ideale elektrische Beleuchtung einzurichten. Es sollten in dem zu beleuchtenden Raum nur an zwei gegenüberliegenden Wänden derartige große Metallplatten aufgestellt werden und mit den Teslapolen verbunden werden. Dann kann man an beliebiger Stelle des Raumes durch eine Geißlersche Röhre ohne jede Drahtverbindung Beleuchtung hervorbringen. Allerdings ist in diesem Projekt viel aussichtslose Zukunftsmusik enthalten.

Fig. 273.

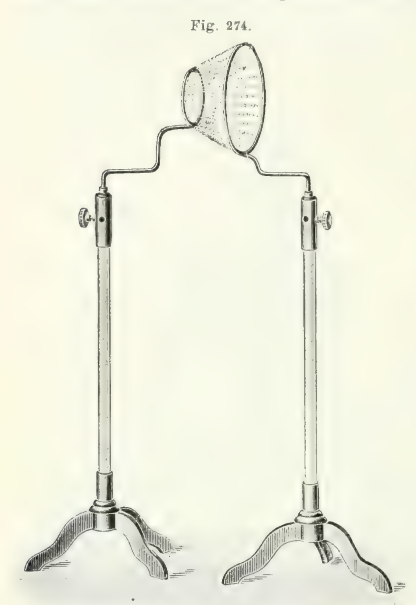


Sehr auffallend ist es, daß die elektrischen Oszillationen von hoher Frequenz eine außerordentlich geringe physiologische Wirkung auf den menschlichen Körper ausüben. Wenn man einen gewöhnlichen, langsam wechselnden Induktionsstrom, wie er von einem Induktionsapparat geliefert wird, durch den Körper gehen läßt, so erhält man heftige Schläge, die bei großer Intensität des Stromes sogar tödlich werden können. Die raschen Oszillationen dagegen, und sogar die von hoher Spannung wie bei den Teslaschen Versuchen, wirken auf den Körper gar nicht oder nur sehr unbedeutend ein. Man kann die Pole der Teslarolle mit den Händen anfassen und die Oszillationen durch den Körper hindurchgehen

lassen, man kann Funken von einem halben Meter Länge aus dem einen Pol einfach in die Hand schlagen lassen, ohne einen Schmerz zu fühlen. Es beruht das vermutlich darauf, daß bei den außerordentlich rasch wechselnden Strömen in den Flüssigkeiten des Körpers keine elektrolytische Zersetzung eintreten kann.

Bei unseren bisherigen Erörterungen wurden die elektrischen Schwingungen immer dadurch erzeugt, daß geladene Leydener Flaschen von mehr oder minder großer Kapazität durch einen Funken entladen wurden. Das Gebiet der elektrischen Oszillationen erstreckt sich aber bedeutend weiter.

Fig. 274.

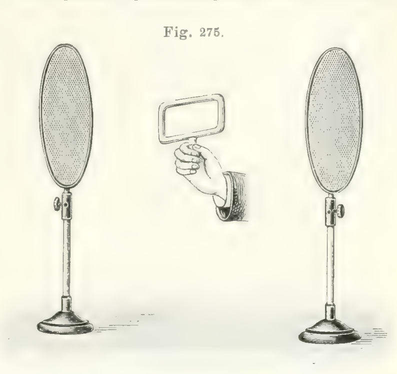


Elektrische Oszillationen müssen nämlich jedesmal eintreten, wenn zwischen zwei geladenen Leitern eine Entladung durch einen Funken stattfindet. Nur wird eben die Periode dieser Oszillationen um so kürzer sein, je geringer die Kapazität dieser Leiter ist.

Äußerst rasche derartige Schwingungen hat nun Heinrich Hertz in Karlsruhe zuerst dadurch hervorgebracht, daß er zwischen zwei einander gegenübergestellten Drähten, wie $a\,a_1$ und $b\,b_1$, in Fig. 276, deren jeder mit einem Zylinder A und B oder mit einer Platte oder Kugel verbunden war, Funken übergehen ließ. Er verband die sekundären Pole eines Induktionsapparates J durch Drähte mit den beiden geradlinigen Leitern $a\,a_1$ und $b\,b_1$, wodurch zwischen den beiden Endkugeln a und b die einzelnen Entladungsfunken überspringen. Jeder solche Entladungsfunke ist aber auch hier wieder oszillatorisch. Die Entladung geht auch hierbei wieder in Schwingungen vor sich, und da die Kapazität dieser geradlinigen Leiter mit ihren Zylindern oder Platten und ebenso das Selbstpotential der Leitung sehr klein ist, so ist hierbei die Schwingungsdauer dieser Oszillationen äußerst klein. Die Kapazität der Drähte $a\,a_1$ und $b\,b_1$ an sich ist eine so kleine, daß auf ihnen nur sehr geringe Elektrizitätsmengen vorhanden sein können. Die Metallzylinder A und B vermehren die Kapazität dieses Entladungsapparates, die aber immer noch sehr viel geringer ist als die Kapazität auch einer kleinen Leydener Flasche. In solchen Apparaten zählt die Dauer der Oszillationen etwa nach Hundertmillionsteln von Sekunden. Man hat sich den Vorgang bei

den Entladungen in einem solchen Apparat also so zu denken: Bei einer Öffnung des primären Stromes in J entsteht ein Induktionsstoß, welcher den Leiter a a_1 A z. B. positiv, den Leiter b b_1 B negativ ladet. Diese beiden entgegengesetzten Elektrizitäten gleichen sich sofort durch die zwischen a und b vorhandene Luftschicht aus, aber dieser Ausgleich geschieht oszillierend, so daß in dem ganzen geradlinigen Leiter a_1 bis b_1 und der Luftschicht dazwischen geradlinige Schwingungen stattfinden. Die Entladung zwischen a und b geht nicht etwa durch den Metalldraht des Induktionsapparates, weil dieser zu großes Selbstpotential hat (also als Drosselspule [S. 229] wirkt), sondern eben durch die Luftschicht. Diese Oszillationen, die, wie gesagt, in etwa dem hundertmillionsten Teil einer Sekunde aufeinander folgen, finden bei jedem einzelnen Öffnungsfunken statt. Sie sind schon vollständig abgelaufen, wenn durch eine neue Öffnung der primären Spule ein zweiter Öffnungsstrom nach a und b gesendet wird. Dieser ladet A und B wieder und die Entladung ist wieder oszillierend u. s. w.

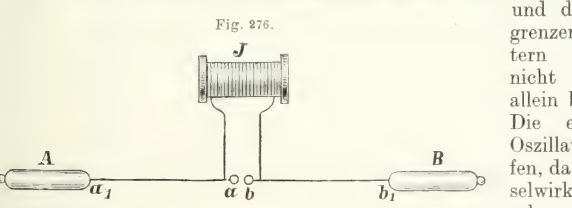
Fig. 275.



Diese sehr raschen elektrischen Schwingungen haben nun eine äußerst wichtige Bedeutung erlangt durch die Anwendungen, welche Hertz von ihnen machte, und durch welche er das Gebiet der Elektrodynamik ganz wesentlich erweiterte.

Es ist nämlich die oszillierende Bewegung, die in der Funkenstrecke und den sie begrenzenden Leitern stattfindet, nicht auf diese allein beschränkt. Die elektrischen Oszillationen rufen, da eine Wechselwirkung zwischen den Elektronen und dem Äther stattfindet, auch eine oszillierende Bewegung des Äthers hervor. Wird aber der angrenzende Äther in periodisch hin und her gehende Bewegung versetzt, so muß sich diese auch von da aus nach allen Seiten durch den Äther ausbreiten, es müssen von der Funkenstrecke aus Ätherwellen nach allen Richtungen fortlaufen, ganz so wie von einem brennenden Streichholz Lichtwellen, d. h. Ätherwellen nach allen Richtungen ausgehen. Vorausgesetzt ist dabei allerdings, daß diese elektrischen Bewegungen des Äthers eine meßbare Fort-

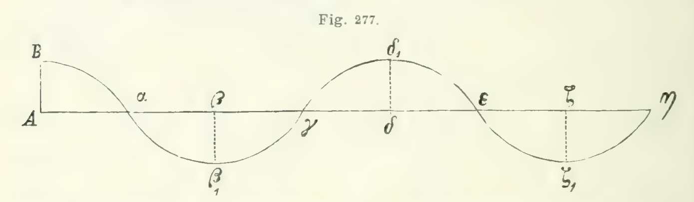
Fig. 276.



pflanzungsgeschwindigkeit haben, daß nicht momentan, ohne Zeitverlust, sondern in bestimmter, wenn auch sehr kurzer Zeit die Bewegung von einem Ätherteilchen zu einem benachbarten kommt. Auch bei dem Licht kommt nur dadurch der Äther rings um einen leuchtenden Körper in fortschreitende Wellenbewegung, daß eben das Licht Zeit zu seiner Fortpflanzung braucht.

Wenn aber die Induktionswirkungen Zeit zu ihrer Fortpflanzung brauchen, so kann man leicht übersehen, wie sich in der Nähe einer solchen raschen elektrischen Schwingung die Verhältnisse gestalten. Nehmen wir z. B. an, wie es wirklich der Fall ist, es sei die Geschwindigkeit, mit der die elektrischen Ätherbewegungen sich ausbreiten, 300 Millionen Meter in der Sekunde, so würde folgendes stattfinden. Wir wollen annehmen, daß eine elektrische Oszillation von 1 Zehnmillionstelsekunde Schwingungsdauer vertikal auf und nieder geht, etwa zwischen den vertikal gestellten Drähten von Fig. 276. Wenn dann in Fig. 277 diese primäre Schwingung in AB schon eine Zeitlang fortgegangen ist und in einem bestimmten Moment die Bewegung in AB gerade von A nach B geht, so muß in diesem Moment im Punkt β, der 15 m entfernt ist, die Bewegung gerade entgegengesetzt von β nach β_1 gehen, im Punkte δ,

Fig. 277.



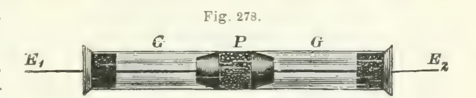
der 30 m entfernt ist, wieder, wie in AB, von δ nach δ_1, u. s. f. Denn während in AB die Schwingung einmal hin und her geht (und das geschieht der Voraussetzung nach in 1 Zehnmillionstelsekunde), muß sich bei der angenommenen Geschwindigkeit die Bewegung gerade um 30 Meter fortgepflanzt haben. Mitten zwischen diesen Punkten müssen andere liegen, α, γ, ε, in welchen in demselben Moment gar keine Bewegung vorhanden ist, die also in diesem Moment in Ruhe sind. Würde man einen Apparat haben, der die elektrischen Bewegungen an jeder dieser Stellen anzeigte, und würde man solche Apparate in diesem Moment an die Stelle α, β, γ, δ, ε, ζ, η u. s. w. bringen, so könnte man dann beobachten, wie in β und ζ die Bewegung von oben nach unten, in δ von unten nach oben geht, während je in der Mitte zwischen diesen, in α, γ, ε, η, in diesem Moment gar keine Bewegung stattfindet. Die Strecke A δ zwischen den beiden Stellen, an denen die Oszillationen gleich groß und gleich gerichtet sind, bezeichnet man als die Wellenlänge der Schwingung. Dieselbe Strecke ist zwischen α und ε oder zwischen β und ζ vorhanden.

Es muß also zunächst, und darauf kommt alles an, ein Instrument gefunden werden, welches das Vorhandensein und die Stärke der elektrischen Bewegung an irgend einer Stelle des Raumes in der Nähe einer Schwingung erkennen läßt. Dieses Mittel fand Hertz darin, daß

er an diejenigen Stellen, in denen er die elektrische Bewegung beobachten wollte, einen Leiter brachte, der eine kleine Luftstrecke enthielt, etwa einen zu einem nahezu geschlossenen Kreis gebogenen Draht. Infolge der Induktionswirkungen, die an der Stelle, wo dieser Leiter hingebracht ist, herrschen, entstehen in ihm elektrische Spannungen, die sich durch das Überspringen von kleinen Fünkchen anzeigen. Mit diesem Mittel, ausgestattet konnte Hertz in der Tat nachweisen, daß sich in dem Luftraum um einen oszillierenden Funken herum die Induktionswirkungen wellenförmig ausbreiten und er konnte sogar direkt die Geschwindigkeit messen, mit der diese Ausbreitung vor sich geht. Es ergab sich, daß diese, wie oben angeführt, 300 Millionen Meter in der Sekunde beträgt, daß sie also genau so groß ist, wie die Geschwindigkeit des Lichtes, eine Tatsache, deren wichtige Folgerungen wir nachher besprechen werden.

Indes war die Methode, wie Hertz die Wirkung der oszillierenden Entladung in der Ferne nachwies, nämlich durch Beobachtung winziger Fünkchen sehr mühsam, und daher waren die Versuche von Hertz lange Zeit nur mit großen Hilfsmitteln auszuführen. Sie wurden erst bequem anzustellen, als eine Beobachtung eines französischen Gelehrten, Branly, hinzukam, welche die Untersuchung solcher elektrischen Wellen außerordentlich erleichtert. Branly brachte nämlich in eine Glasröhre G wie in Fig. 278 grob gepulverte Metallspäne P und führte in die Glasröhre zwei Elektroden E_1 und E_2 ein, welche das Metallpulver berührten. Da der Kontakt zwischen den einzelnen lockeren Metallteilchen ein sehr schlechter ist, so hat ein solches System einen außerordentlich großen Leitungswiderstand, der nach Hunderttausenden von Ohm zählt. Ein Strom von einem galvanischen Element geht also nur in minimalen Beträgen durch eine solche Röhre hindurch. Sowie aber, und das war die Entdeckung von Branly, eine elektrische Welle auf diese Röhre fällt, treten zwischen den einzelnen lockeren Metallteilchen minimale, unsichtbare Fünkchen auf, welche die Oberfläche zweier benachbarten Metallspäne aneinander schweißen. Dadurch wird der Kontakt zwischen ihnen sofort ein guter und der Widerstand der Röhre sinkt sofort auf einen kleinen Betrag, etwa 5 oder 10 Ohm, herunter. Dasselbe galvanische Element, das vorher kaum einen Strom durch die Röhre hindurchgebracht hatte, liefert daher jetzt einen ganz kräftigen Strom hindurch.

Fig. 278.



Eine solche Röhre mit Metallpulver — man kann Eisen-, Nickel-, Silberpulver oder anderes nehmen — ist also ein sehr feines Reagenzmittel auf elektrische Wellen. Man bezeichnet einen solchen Apparat als Kohärer, ein abscheulich gebildetes Wort, welches anzeigen soll, daß die lockeren Metallteilchen durch die Wellen kohärent werden. In Deutschland braucht man häufig die Bezeichnung Fritter, obwohl solche international gebrauchte Apparate auch mit einem internationalen, d. h. aus dem Lateinischen oder Griechischen entnommenen Namen belegt werden sollten. Um den Kohärer anzuwenden, bildet man, wie Fig. 279

zeigt, einen Stromkreis aus einem Element E, dem Kohärer C und einem Galvanoskop G. Solange das Pulver im Kohärer locker ist, macht der Zeiger des Galvanoskops keinen Ausschlag. Sobald aber elektrische Wellen auf C fallen, fließt der Strom von E durch C und G, und das Galvanoskop schlägt aus. Einen Übelstand dieser Anordnung erkennt man aber sofort. Sobald einmal die Wellen auf den Kohärer gefallen sind, hat dieser einen kleinen Widerstand erlangt und behält diesen natürlich auch bei, wenn die Wellen aufhören. Es ist ja kein Grund dafür vorhanden, daß die zusammengeschweißten Teilchen sich wieder trennen sollten. Man braucht aber dann nur die Röhre etwas durch Anklopfen zu erschüttern, dann lagern sich die

Fig. 279.

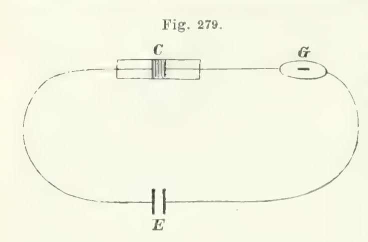


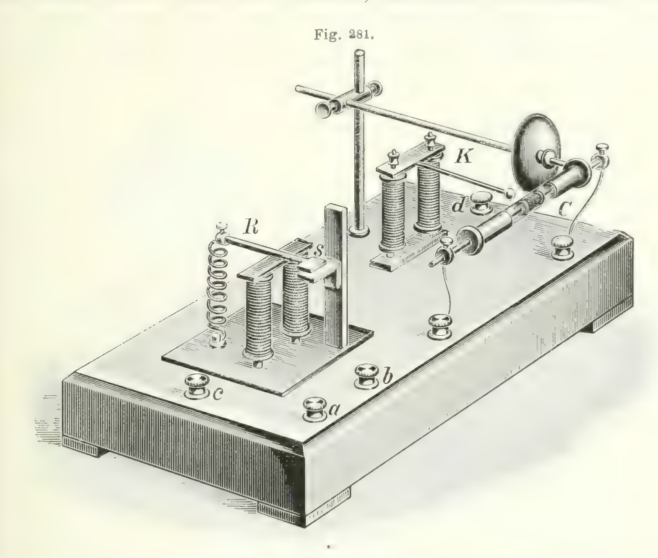
Fig. 280.

Teilchen wieder locker an und der große Widerstand ist wieder da, der Kohärer kann von neuem funktionieren.

Da nun aber dieses Anklopfen mit der Hand lästig ist, so ersetzt man es vorteilhaft durch eine automatische Anordnung. Man bewirkt nämlich, wenn der Strom von dem Element durch den Kohärer geht,

daß dann auch ein Strom durch eine elektrische Klingel fließt, deren Klöppel dann den Kohärer anstößt, so daß dieser wieder den großen Widerstand annimmt. Zweckmäßig wird dabei das Galvanometer als überflüssig ganz fortgelassen, weil man ja schon durch das Tönen der Klingel erkennt, daß Wellen auf den Kohärer aufgetroffen sind. Man schaltet vielmehr zu dem Kohärer einen kleinen Elektromagneten mit sehr vielen Umwindungen, ein sogenanntes Relais, dessen Anker bloß eine kleine Bewegung zu machen braucht, um einen besonderen Stromkreis zu schließen, in dem ein Element und eine elektrische Klingel sich befinden. Eine solche Schaltung zeigt Fig. 280. Vom Element E geht der Strom über a durch das Relais R, dann durch den Kohärer C zu b

Fig. 281.

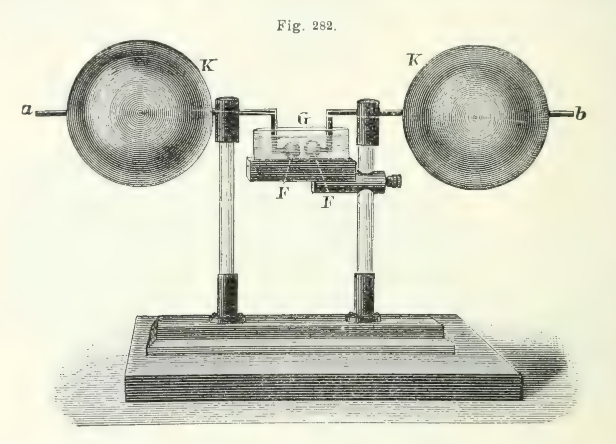


und zum Element zurück. Sowie nun der Anker des Relais angezogen wird und sich an die Spitze s anlegt, geht ein Strom von dem Element A, durch s und die elektrische Klingel K zum Element zurück. Der Kohärer wird dadurch erschüttert und kann wieder funktionieren. Eine Ansicht eines derartig eingerichteten Apparates gibt Fig. 281, in welcher die einzelnen Teile ebenso bezeichnet sind wie in Fig. 280; insbesondere ist C der Kohärer, K die Klingel, R das Relais.

Mit einem solchen Kohärer ausgerüstet, ist es nun leicht, elektrische Wellen, auch außerordentlich schwache, zu erkennen. Wir erzeugen z. B. die Oszillationen in einem Apparat wie Fig. 282, der ganz ähnlich dem von Hertz gebrauchten Apparat (Fig. 276) ist. Auf zwei Stäben a, b sitzen, um die Kapazität zu vergrößern, zwei große Kugeln von je 15 cm Durchmesser, K und K. Am Ende jedes Stabes ist je eine kleine Kugel F F

angebracht, zwischen denen die Funken übergehen. Diese kleinen Kugeln läßt man am besten nicht in Luft, sondern in Petroleum, das in dem Glasgefäß G sich befindet, einander gegenüberstehen, zu welchem Zweck die Stäbe rechtwinklig umgebogen sind. Die Anwendung des Petroleums hat den Vorteil, daß beim Funkenübergang die Kugeln nicht oxydiert werden, was wegen des großen Widerstands der Oxydschicht der Entstehung der Wellen hinderlich ist. Der Strom von einem Induktionsapparat wird dem Leitersystem bei a und b zugeführt. Die Funken, die zwischen F und F entstehen, erzeugen dann Wellen, deren Länge noch einige Meter beträgt, also sehr groß ist. Daher verbreiten sich diese Wellen ganz wie Schallwellen überall in einem Zimmer, und wo man auch den Kohärer hinstellt, meterweit entfernt von der Funkenstrecke, überall reagiert er, überall tönt seine Klingel. Diese langen Wellen gehen eben nicht geradlinig fort wie die kurzen Wellen des Lichtes, sondern

Fig. 282.



sie breiten sich nach allen Richtungen aus und biegen sich bei allen Hindernissen um wie die Schallwellen, die ja auch leicht um Ecken herum gehen.

Will man Wellen von geringerer Länge haben, die sich nicht so leicht nach allen Seiten ausbreiten, so muß man die Funken zwischen viel kleineren Leitern, zwischen Leitern von geringerer Kapazität erzeugen. Man hat solche äußerst rasche Schwingungen erzeugt, bei denen Milliarden, ja sogar Hundertmilliarden Schwingungen in der Sekunde ablaufen, indem man immer kleinere und kleinere Leiter angewendet hat, zwischen denen die Funken übergehen. Natürlich ist die Stärke dieser Schwingungen bei kleinen Leitern unter sonst gleichen Umständen auch viel geringer als bei großen, weil eben die Elektrizitätsmengen, mit denen die kleinen Leiter geladen werden, und durch deren Bewegung die Schwingungen erzeugt werden, unter gleichen Umständen viel geringer sind als bei großen Leitern.

Wenn man die Schwingungsdauer der Oszillationen in dem Erreger kennt, und wenn man die Wellenlänge dieser Schwingungen messen kann — und wir werden sehen, wie man das kann —, so kann man auch die Geschwindigkeit berechnen, mit der die elektrischen Wellen sich fortpflanzen. Denn da während der Dauer einer Schwingung sich die Bewegung gerade um eine Wellenlänge fortpflanzt, so ist allgemein bei jeder Wellenbewegung die

$$\text{Geschwindigkeit der Fortpflanzung} = \frac{\text{Wellenlänge}}{\text{Schwingungsdauer}}.$$

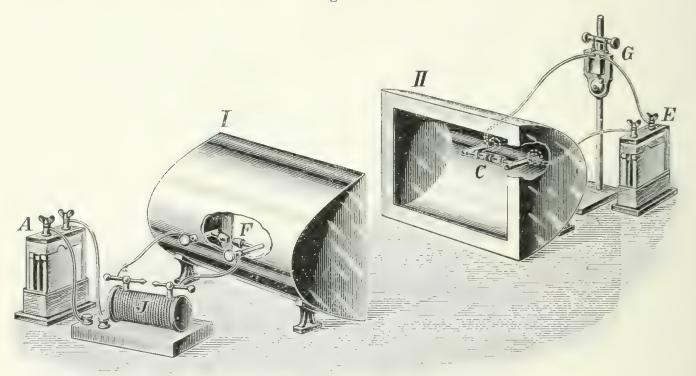
Derartige Versuche und Berechnungen hat nun Hertz wirklich ausgeführt, und er fand auf diese Weise, wie oben angegeben, daß die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der elektrischen Wellen eine sehr große ist, nämlich 300 000 km in einer Sekunde beträgt.

Dieses Resultat ist nun aber von größter Bedeutung. Denn diese Geschwindigkeit ist dieselbe, mit der das Licht sich durch den Raum fortpflanzt. Die elektrischen Wellen durchlaufen also den Raum mit derselben Geschwindigkeit, wie die Lichtwellen. Da man nun gerade wegen dieser so großen Geschwindigkeit des Lichtes geschlossen hatte, daß die Substanz, in welcher die Lichtwellen verlaufen, ein sehr feiner Stoff sein müsse, der Äther, so werden wir jetzt auch schließen müssen, was wir bisher schon antizipiert getan haben, daß diese elektrischen Wellen durch den Äther sich fortpflanzen. Ja wir können noch weiter gehen. Wir können sagen: Lichtwellen und elektrische Wellen sind ganz dasselbe, nämlich Schwingungen des Äthers, nur von ungleichen Größenverhältnissen. Lichtwellen, welche auf unser Auge wirken, haben Wellenlängen, die je nach der Farbe zwischen 4 und $7\frac{1}{2}$ Zehntausendsteln eines Millimeters liegen. Längere Wellen, bis zu 80 oder 100 Tausendsteln eines Millimeters, wirken noch erwärmend, thermisch, auf feine Apparate. Unsere elektrischen Wellen sind zwar sehr viel größer, ihre Wellenlängen sind einige Zentimeter oder Meter. Aber der Unterschied ist doch nur ein gradueller. Man kann also auf Grund dieser Experimente sagen, elektrische Wellen von sehr kurzer Schwingungsdauer erscheinen uns als Lichtwellen, oder Ätherwellen von verhältnismäßig sehr großer Schwingungsdauer sehen wir nicht mehr als Licht, sondern sie zeigen sich uns durch ihre Induktionswirkungen an, sie sind elektrische Wellen.

Wenn das aber richtig ist — und in den Schlußfolgerungen steckt keine Lücke — so muß es auch möglich sein, mit den elektrischen Wellen ebensolche Erscheinungen hervorzurufen wie mit Lichtwellen. Auch diese weiteren Folgerungen hat zuerst Hertz experimentell bewiesen. Er hat gezeigt, daß die elektrischen Wellen von Metallflächen ebenso reflektiert werden, wie die Lichtwellen von einem Spiegel, daß sie durch Prismen abgelenkt werden, wie das Licht. Er hat weiter die Tatsache der Reflexion dazu benutzt, um die elektrischen Wellen durch einen Hohlspiegel zusammenzuhalten. Indem er die Funkenstrecke, in welcher die Wellen erzeugt werden, in die Brennlinie eines parabolischen Metall-

zylinders brachte, wirkte dieser wie ein Hohlspiegel auf das Licht und reflektierte die Wellen konzentiert, als einen elektrischen Strahl, der aus der Öffnung des Hohlspiegels heraustrat. Bei einem solchen elektrischen Strahl konnte Hertz die Wirkungen viel weiter verfolgen, auf mehr als 30 m, als bei nicht konzentrierten Wellen. Mit den kurzen Wellen, die man jetzt zu erzeugen gelernt hat, ist es ganz leicht, die Hertzschen Versuche in kleinen Dimensionen auszuführen, insbesondere, wenn man auch bei ihnen durch parabolisch gekrümmte Metallzylinder, also durch Spiegel, elektrische Strahlen erzeugt. In Fig. 283 ist die Anordnung für solche Versuche gezeichnet. Man sieht zwei solche Parabolspiegel aus Metall. In dem einen I ist die erregende Funkenstrecke F in der Brennlinie angebracht, in dem anderen II der Kohärer C. Die Funkenstrecke F besteht aus zwei kleinen, einander nahe gegenüberstehenden Metallstücken, welche mittels Drähten, die durch den Spiegel hindurch-

Fig. 283.



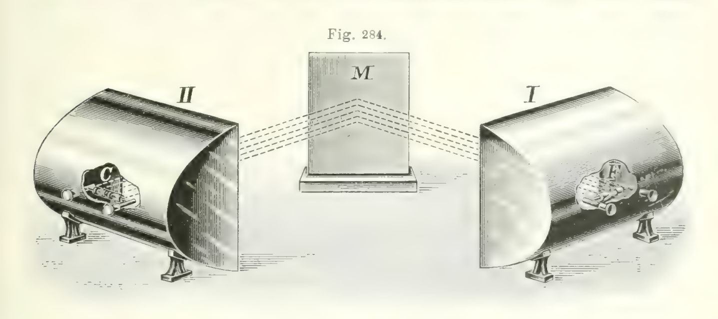
gehen, mit dem kleinen Induktionsapparat J verbunden sind. Auch der Kohärer C im zweiten Spiegel ist durch Drähte, die durch den Spiegel hindurchführen, verbunden mit einem Element E und einer elektrischen Glocke G. Wenn diese Spiegel, wie in der Figur, einander gegenüberstehen und wenn der Induktionsapparat in Tätigkeit gesetzt wird, so daß in F Fünkchen übergehen, so reagiert der Kohärer sofort und die Glocke ertönt. Da dieser Kohärer nicht automatisch abgeklopft wird, so muß man durch ein Klopfen mit der Hand ihn wieder in den ursprünglichen Zustand bringen, ihn, wie man sagt, entfritten. Bringt man den Kohärerspiegel aus der Strahlrichtung des ersten Spiegels heraus, so funktioniert der Kohärer nicht.

Stellt man zwischen die beiden Spiegel einen Schirm aus Metall, so hört der Kohärer auf zu funktionieren. Durch Metalle gehen also die elektrischen Wellen nicht hindurch. Dagegen gehen sie durch Isolatoren hindurch, durch Glas, Paraffin, Ebonit, Schwefel, Holz; durch

verschlossene Türen dringen sie aus einem Zimmer in das andere, und man kann in einem ganz verschlossenen Zimmer die Klingel des Kohärers tönen hören, während die elektrischen Wellen außerhalb in einem anderen Zimmer erzeugt wurden.

Stellt man die beiden Spiegel nicht einander gegenüber, sondern den einen seitlich von dem anderen auf, so bleibt der Kohärer in Ruhe. Läßt man aber, wie in Fig. 284, die elektrischen Strahlen von dem ersten

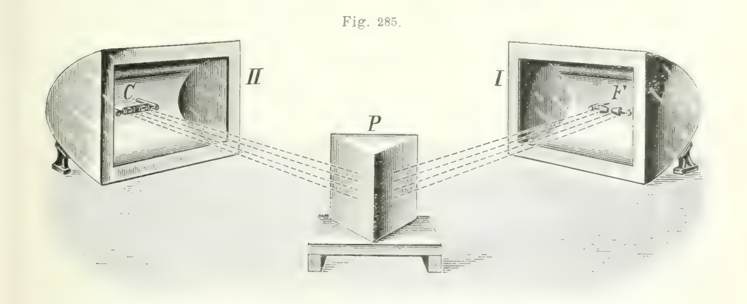
Fig. 284.



Spiegel auf ein Metallblech M auffallen, so werden sie von diesem reflektiert, und man kann die Stellung des Metallblechs leicht so wählen, daß die reflektierten Strahlen in den zweiten Spiegel und auf dessen Kohärer fallen und diesen anregen. Die elektrischen Strahlen lassen sich also genau so reflektieren wie Lichtstrahlen.

So wie ferner ein Lichtstrahl durch ein Prisma gebrochen, aus seiner

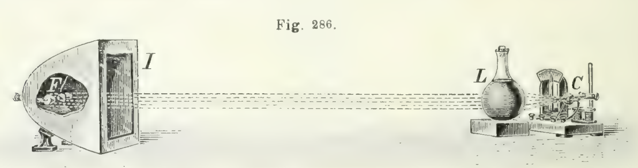
Fig. 285.



geradlinigen Richtung abgelenkt wird, so werden auch die elektrischen Strahlen gebrochen. Bringt man, Fig. 285, ein Prisma P aus Paraffin, etwa von 15 cm Kantenlänge, in den Strahl hinein, der vom ersten Spiegel kommt, so wird der elektrische Strahl ebenso von der Kante des Prismas weg gebrochen wie ein Lichtstrahl, und man kann den seitlich stehenden Kohärer in seinem Spiegel II damit zum Ansprechen bringen.

Daraus folgt, daß man auch durch Linsen die elektrischen Strahlen in einen Brennpunkt vereinigen können muß. Denn die Wirkung der Linsen beruht ja auch auf der Brechung, wie die der Prismen. Hier bei diesen zentimeterlangen Wellen braucht man mit der genauen Konstruktion der Linsenflächen nicht ängstlich zu sein. Eine gewöhnliche runde Glasflasche, mit einer isolierenden Substanz, wie Petroleum, gefüllt, wirkt schon als Linse. Stellt man in Fig. 286 einen automatisch wirkenden Kohärer C so weit von dem Spiegel I mit der Funkenstrecke entfernt auf, daß der Kohärer von selbst nicht mehr beeinflußt wird, so kann man durch Zwischenstellen einer solchen als Linse wirkenden Flasche L ihn

Fig. 286.



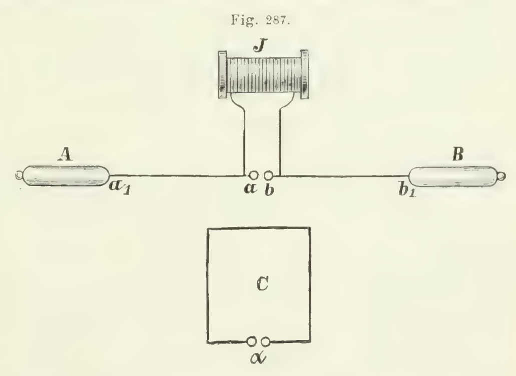
wieder zum Ansprechen bringen. Diese Vorgänge und eine große Anzahl anderer, die bei dem Licht bekannt sind, lassen sich also auch mit diesen elektrischen Wellen hervorbringen, und die Gleichartigkeit dieser Erscheinungen ist dadurch endgültig bewiesen.

Mit diesen Entdeckungen ist nun ein Verständnis vieler elektrischen Erscheinungen erreicht. Die elektrischen Schwingungen pflanzen sich durch die Luft und überhaupt durch jedes Dielektrikum ebenso fort wie die Lichtschwingungen, d. h. mit der Geschwindigkeit des Lichtes und als Transversalwellen. Die elektrische Bewegung an jeder Stelle des Dielektrikums ist immer senkrecht auf der Richtung, in der diese Bewegung durch das Dielektrikum weiterschreitet. Das ist der Begriff der Transversalwellen. Derartige Wellen finden z. B. an der Oberfläche eines Teiches statt, wenn man einen Stein hineinwirft. Jedes Wasserteilchen bewegt sich, „schwappt“ vertikal auf und nieder, aber die ganze Bewegung an sich schreitet (in Kreisen) an der Oberfläche des Teiches entlang. Die schwingende Bewegung jedes Wasserteilchens ist also senkrecht zu den Richtungen, in denen die Wellenbewegung fortschreitet. Ebendasselbe findet statt, wenn irgendwo im Raume ein Streichholz angezündet wird. Von der Flamme aus wird der Äther in schwingende Bewegung versetzt und diese Bewegung schreitet (in Kugeln) nach allen Richtungen fort, jedoch so, daß die Bewegung jedes Ätherteilchens nicht in der Richtung der Fortpflanzung, sondern senkrecht dazu stattfindet. Wir haben Lichtwellen. Und ebenso, wenn wir in horizontal einander gegenüberstehenden Leitern, wie in der Funkenstrecke unseres ersten Spiegels, durch elektrische Funken eine elektrische Bewegung nach vorn und hinten erzeugen (das Analogon des brennenden Streichholzes), so pflanzt sich diese Bewegung durch den Äther nach rechts oder links fort und im Äther macht jedes Teilchen Bewegungen nach vorn oder hinten, senkrecht zu der Fortpflanzungsrichtung.

Die elektrischen Schwingungen, die durch Entladungen von großen

oder kleinen Kondensatoren entstehen, sind mit den Lichtwellen von gleicher Natur, indem sie wie diese sich im Äther fortpflanzen und Schwingungszahlen haben, die in die Millionen oder Milliarden gehen. Die Lichtwellen haben zwar noch größere Schwingungszahlen, in die Billionen gehende, aber jedenfalls sind für unsere Verhältnisse die ersteren sowohl wie die letzteren ganz außerordentlich rasche Schwingungen. In einer anderen Hinsicht aber ähneln die elektrischen Schwingungen viel mehr den Schallwellen als den Lichtwellen, nämlich in Bezug auf die Wellenlänge. Die elektrischen Wellen, welche wir bequem erzeugen können, haben, wie erwähnt, Wellenlängen, die nach Zentimetern oder Metern messen, und von derselben Größenordnung sind auch die Längen der Schallwellen in der Luft. Es hat z. B. der Ton e der eingestrichenen Oktave (e^1) eine Wellenlänge von rund einem Meter in der Luft, das c der viergestrichenen Oktave (c^4) eine solche von 16 Zentimetern u. s. f. Obwohl die angegebenen Töne sehr viel kleinere Schwingungszahlen haben als die entsprechenden elektrischen Schwingungen — nur einige Hundert oder Tausend, gegenüber den Milliarden —, sind doch die Wellenlängen von derselben Größe. Das kommt daher, daß die Schallschwingungen sich in der Luft mit einer verhältnismäßig sehr kleinen Geschwindigkeit (330 Meter pro Sekunde) fortpflanzen, während die elektrischen Wellen sich im Äther mit der oben angegebenen ungeheuren Geschwindigkeit ausbreiten. Diese Ähnlichkeit der Schallwellen mit den elektrischen in Bezug auf die Wellenlängen setzte uns in den Stand, die Erscheinungen der Resonanz bei den elektrischen Wellen hervorzubringen (oben S. 273).

Fig. 287.



Diese Resonanzerscheinungen haben wir früher bei den Schwingungen gefunden, die durch Entladung von Leydener Flaschen erzeugt wurden, die also etwa die Frequenz von 1 Million Schwingungen pro Sekunde hatten. Aber auch bei den so sehr raschen Schwingungen, die Hertz erzeugt hat, gelingt es leicht, Resonanzerscheinungen hervorzurufen, wie schon Hertz selbst gezeigt hat. Zu dem Zweck erzeugen wir wieder (wie auf S. 283) elektrische Schwingungen in einem ausgespannten Draht a_1 a b b_1 mit angesetzten Zylindern A B und einer Funkenstrecke a b (Fig. 287), und in die Nähe dieser, wie wir sie nennen wollen, primären Schwingungen bringen wir ein Drahtviereck C, das nahezu geschlossen, bloß durch eine kleine Funkenstrecke α, die wir uns regulierbar denken, unterbrochen ist. Die elektrischen

Schwingungen in A und B erzeugen durch Induktion natürlich auch elektrische Schwingungen (sekundäre) in dem Drahtviereck C, die sich durch Fünkchen in α anzeigen. Man kann aber diese sekundären Schwingungen bedeutend kräftiger machen — bei gleicher Lage von C gegen den primären Stromkreis —, indem man den Drahtkreis C und die primäre Schwingung aufeinander a b s t i m m t, also indem man Resonanz zu erzielen sucht.

Da die Schwingungszahl elektrischer Schwingungen in einem Drahtsystem nur abhängt von der Kapazität und der Selbstinduktion des Systems, so erkennt man, daß man eine solche Abstimmung erreichen kann, indem man in dem primären System A a b B oder in dem sekundären System C die Kapazität oder die Selbstinduktion oder beide passend ändert. Man kann also z. B. den Zylindern A und B größere Kapazität erteilen, indem man ihre Fläche vergrößert, also etwa indem man Streifen von Stanniolpapier an ihnen befestigt, oder man kann statt der geraden Drähte $a\,a_1$ und $b\,b_1$ spiralförmig gewundene einführen, wodurch die primäre Selbstinduktion vergrößert wird. Oder man kann ferner an die Drähte von C Stanniolstreifen verschiedener Größe anhängen, wodurch die Kapazität von C verändert wird, oder endlich kann man auch in C statt der geraden Drähte spiralförmige einführen, oder man kann die Länge der Seiten verändern, wodurch immer die Selbstinduktion variiert wird. Durch diese verschiedenen Mittel hat man es in der Hand, den sekundären Drahtkreis C und die primäre Schwingung aufeinander abzustimmen, sie in Resonanz zu bringen, was sich immer durch bedeutend stärkere Schwingungen in C, also durch lebhaftere und längere Funken in α anzeigt. Die Resonanz elektrischer Schwingungen ist in der neueren Entwicklung der drahtlosen Telegraphie von erheblicher Bedeutung geworden.

Während wir oben bei den Versuchen von Seibt (S. 274) die beiden aufeinander abzustimmenden Systeme g a l v a n i s c h g e k o p p e l t hatten, d. h. direkt durch einen Leitungsdraht verbunden haben, haben wir hier in dem Versuch von Fig. 287 eine i n d u k t i v e K o p p e l u n g der beiden Systeme, da sie, ohne Verbindungsdraht, bloß durch Induktion aufeinander wirken. Bei dieser induktiven Koppelung kann man aber noch einige Hauptfälle unterscheiden. Wenn nämlich der resonierende Schwingungskreis C sehr nahe an dem anregenden ist, so wird die Schwingungsdauer des anregenden Kreises selbst geändert, sie ist nicht mehr dieselbe, wie wenn der resonierende Kreis entfernt wäre. Man kann sich das einfach dadurch klar machen, daß durch die große Nähe des zweiten Kreises ja eine Art Kondensator entsteht, die Kapazität des ersten Kreises wird also dadurch verändert und damit auch seine Schwingungsdauer. Man sagt dann, die beiden Schwingungskreise sind e n g g e k o p p e l t. Je weiter man mit dem zweiten Kreis vom ersten fortgeht, desto geringer ist die Rückwirkung desselben, und man kann eine Entfernung finden, in welcher der resonierende Kreis zwar noch angeregt wird, aber keine merkbare Rückwirkung mehr auf den anregenden ausübt. Die in diesem Falle bestehende (induktive) Verbindung bezeichnet man als l o s e K o p p e l u n g. Von der Energie des anregenden Kreises wird dann ein Bruchteil, sagen wir 5 Proz., auf den resonierenden übertragen und dieser dadurch zu Schwingungen angeregt. Von dessen Energie gehen dann

wieder 5 Proz. auf den ersten zurück, so daß dessen Energie nur um 1/4 Proz., also unmerklich geändert wird.

Jeder der beiden Schwingungskreise kann dabei ein nahezu geschlossener oder ein offener sein. In Fig. 287 ist der anregende Schwingungskreis AB ein offener, bestehend aus zwei langen ausgestreckten Drähten, während der angeregte und resonierende Kreis C nahezu geschlossen ist. Bei dem Versuche von Seibt (S. 274) war es umgekehrt, der anregende Schwingungskreis war nahezu geschlossen, der resonierende, die beiden Spulen, waren offen, und diese Anordnung wird in der Telegraphie ohne Draht jetzt oft benutzt.

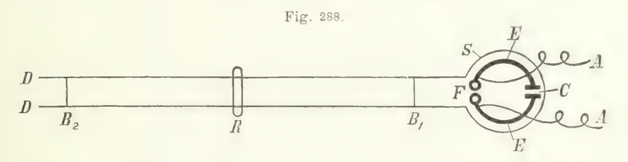
Wir sprachen bisher immer von elektrischen Wellen von größerer oder geringerer Wellenlänge, aber wir haben bisher noch kein Mittel besprochen, wie man die Wellenlängen wirklich messen kann. Eine solche Messung ist aber wichtig. Denn kennt man die Wellenlänge, die ein Oszillator erzeugt, so kann man auch sofort sagen, welches die Dauer einer seiner Schwingungen ist, da immer die

$$\text{Fortpflanzungsgeschwindigkeit} = \frac{\text{Wellenlänge}}{\text{Schwingungsdauer}}$$

ist und die Fortpflanzungsgeschwindigkeit bekannt ist, nämlich gleich der des Lichtes (300 000 km pro Sekunde).

Die Messung von Wellenlängen elektrischer Wellen ist besonders wichtig, wenn man es mit äußerst raschen Schwingungen zu tun hat, und zur Erzeugung derselben hat sich eine besondere Form des Erregers, der Blondlotsche Erreger oder Oszillator, als sehr brauchbar erwiesen. Wir wollen diesen zugleich mit der Anordnung beschreiben, durch welche man die Länge der von ihm erzeugten elektrischen Wellen

Fig. 288.



wirklich mißt. Der Oszillator oder Erreger besteht, wie Fig. 288 zeigt, aus zwei halbkreisförmig gebogenen dicken Drähten E E, welche bei F kleine Kugeln tragen und bei C kleine Platten, die einen Kondensator bilden. Die Platten bei C kann man auch fortlassen. Der Erreger wird in Petroleum gelegt. Von dem Induktionsapparat führen Drähte A A zu den kleinen Kugeln, zwischen denen also Funken überspringen, welche oszillatorisch sind und welche auf den Drähten E E hin und her gehende Bewegungen erzeugen. Um die Wellenlänge der so erzeugten Schwingungen zu bestimmen, umgibt man den Erreger in kleinem Abstand mit einem kreisförmigen Draht S, der dann in die beiden geradlinigen Drähte D D ausgeht. Der Kreisdraht S liegt ebenfalls in Petroleum. Die von ihm ausgehenden Drähte werden isoliert etwa auf einem Brett ausgespannt. Die Anwendung zweier solcher parallelen Drähte ist zuerst von Lecher gelehrt worden und man bezeichnet sie deshalb auch oft als Lechersche

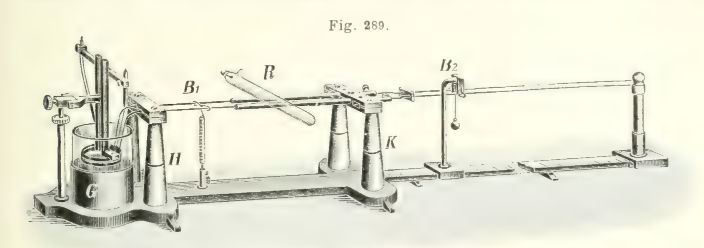
Drähte. Durch Induktion werden nun von dem Erreger auch in dem Kreis S elektrische Schwingungen erzeugt, welche längs der Drähte fortschreiten. Wenn man an einer beliebigen Stelle B_1 einen Drahtbügel über die Drähte legt, eine sogenannte Brücke, so richtet sich die ganze Schwingung so ein, daß an der Stelle B_1 ein sogenannter Knoten der Bewegung ist, daß also an dieser Stelle auf beiden Drähten keine elektrische Bewegung vorhanden ist. Die Lage von B_1 beeinflußt eben auch die Schwingung des Erregers, wie überhaupt der Erreger eine andere Schwingungsdauer hat, wenn er frei für sich ist, als wenn er von dem Drahtring S umgeben ist. An der Stelle B_1 ist also nun zwar keine Bewegung vorhanden, aber auf den Paralleldrähten D D außerhalb B_1 schreitet die Welle fort, dort sind wieder elektrische Bewegungen vorhanden. Legt man nun über die Drähte etwas hinter B_1 eine evakuierte Glasröhre R, eine sogenannte Geißlersche Röhre (am besten eine mit Helium in ziemlicher Verdünnung gefüllte Röhre), so leuchtet diese. Es wird das verdünnte Gas in ihr durch die elektrischen Schwingungen zum Leuchten angeregt. Wenn man nun aber einen zweiten Drahtbügel B_2 außerhalb der Heliumröhre auf die Drähte legt, so hört im allgemeinen die Röhre sofort auf zu leuchten. Verschiebt man B_2, so bleibt auch dann die Röhre im allgemeinen dunkel. Aber wenn man mit B_2 an eine bestimmte Stelle gekommen ist, die in der Figur gerade angegeben ist, so leuchtet R auf. Rückt man von dort aus B_2 noch weiter nach außen, so wird R wieder dunkel, bis man mit B_2 an eine andere bestimmte Stelle kommt, wo sie wieder aufleuchtet. Bei gewissen Stellungen von B_2 also leuchtet R auf, an allen anderen Stellen bleibt sie dunkel. Nun sieht man sofort ein, daß die Röhre nur dann aufleuchten kann, wenn da, wo sie sich befindet, elektrische Bewegungen vorhanden sind, die nicht durch den Bügel B_2 zerstört werden. Der Bügel B_2 kann aber die elektrischen Bewegungen nur dann nicht stören, wenn er sich an einem Knoten der Bewegung befindet, wo an sich keine Bewegung vorhanden ist. Dies ist die Bedingung für das Aufleuchten der Röhre. Und nun erkennt man, daß bei B_1 sowohl wie bei B_2 ein Knoten der Bewegung vorhanden ist. Der Abstand aber zweier aufeinanderfolgender Knoten bei einer Wellenbewegung ist immer gleich der halben Wellenlänge der vorhandenen Schwingung. Damit ist die Wellenlänge, die die Anordnung hervorbringt, gemessen, sie ist doppelt so groß als der Abstand zweier aufeinanderfolgender Knoten auf den Paralleldrähten. Wenn in dem Blondlotschen Erreger kein Kondensator C angebracht ist, so ist angenähert die Wellenlänge auch gleich der doppelten Länge beider kreisförmigen Drähte E E zusammen. Bei einem Kreis von 5 cm Radius ist also die Wellenlänge etwa gleich 60 cm.

Die Anordnung dieses Versuches ist durch einen von Drude angegebenen Apparat (Fig. 289) bequem gemacht. Man sieht bei G auf einer Unterlage einen Glaszylinder stehen, in welchem sich der Blondlotsche Erreger mit dem ihn umgebenden Draht befindet. Von dem letzteren gehen die Paralleldrähte durch Ebonitträger bei H und K hindurch und auf ihnen liegt, durch eine Feder angespannt, die Brücke B_1, während die Brücke B_2 längs der geteilten Schiene so lange verschoben wird, bis die Heliumröhre R aufleuchtet.

Wir hatten bisher die elektrischen Ströme in Drähten, seien es nun

Gleichströme oder Wechselströme oder, wie in diesem Kapitel, elektrische Schwingungen, immer auf die Bewegung von Elektronen in den Drähten zurückgeführt. Wir müssen also speziell annehmen, daß in einem Draht, der von elektrischen Schwingungen durchzogen ist, es die Elektronen selbst sind, die diese Schwingungen ausführen, ganz ähnlich wie die Luftteilchen in einer Pfeife hin und her schwingen. Andererseits aber sahen wir, daß diese Schwingungen sich durch den Äther fortpflanzen und so ohne Drähte in die Ferne Wellen senden. Wir müssen daraus schließen, was wir auch schon früher erkannt haben, daß jedes Elektron, wenn es

Fig. 289.



sich bewegt, den angrenzenden Äther mit in Bewegung setzt, so wie es auch umgekehrt von dem bewegten Äther selbst wieder beeinflußt wird. Die Fortpflanzung elektrischer Wellen in den Drähten haben wir uns danach so vorzustellen, daß zunächst die erste Schicht Elektronen (die zunächst an der Funkenstrecke liegt) in Schwingungen versetzt wird, daß diese den umgebenden Äther nun in Schwingungen bringt und daß diese letzteren sich im Äther, also außerhalb und an der Oberfläche der Drähte mit Lichtgeschwindigkeit fortpflanzen. Diese an der Oberfläche des Drahtes fortschreitenden Ätherwellen veranlassen nun aber überall die im Metall des Drahtes vorhandenen Elektronen, selbst Schwingungen auszuführen, und daher kommt es, daß die Wellen sich längs der Drähte mit derselben Geschwindigkeit fortpflanzen, wie in dem freien Äther.

---

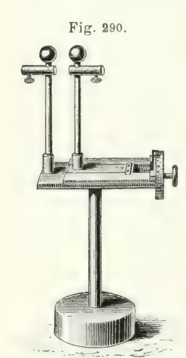
12. Kapitel.

Der Durchgang der Elektrizität durch Gase. Die Röntgenstrahlen.

In allen bisherigen Kapiteln war von dem Verhalten der Luft oder anderer Gase gegenüber der Elektrizität nur sehr vorübergehend die Rede. Das Verhalten der Metalle, der Flüssigkeiten und der Dielektrika in Bezug auf den Strom wurde ausführlich angegeben, aber nicht das der Gase. Und das mit vollem Grund. Denn die Gase zeigen in Bezug auf ihre elektrischen Eigenschaften ein sehr kompliziertes Verhalten, sie zeigen eine Reihe von sehr verschiedenen Erscheinungen und es ist erst allmählich gelungen, in die zunächst verwirrenden Einzelheiten leitende Gesichtspunkte zu bringen und diese Erscheinungen auf einfache Gesetze zurückzuführen.

Die bekannteste elektrische Erscheinung in Gasen ist der elektrische Funke. Wenn zwei entgegengesetzt geladene Leiter einander genähert werden, so springt zwischen ihnen, noch ehe sie zur Berührung kommen, solange sie also noch durch einen Luftzwischenraum getrennt sind, ein heller Funke mit einem knatternden oder zischenden Geräusch über. Durch diesen Funken findet eine Entladung der beiden Leiter statt; denn untersucht man sie nach dem Überspringen des Funkens, so findet man sie unelektrisch. Es ist also während der Dauer dieses Funkens die Elektrizität durch die Luft von dem einen Leiter zum anderen übergegangen. Daß dieser Übergang nicht ein so einfacher ist, wie man zunächst annehmen sollte, sondern ein oszillatorischer ist, haben wir auf S. 270 gesehen. Das kommt aber hier nicht in Betracht.

Fig. 290.



Wie weit die beiden Leiter voneinander entfernt sein dürfen, damit ein Funke zwischen ihnen auftritt, das hängt hauptsächlich von dem Spannungsunterschied zwischen ihnen ab, ein wenig auch von der Form der Leiter. Man bezeichnet den Abstand zweier geladenen Leiter, bei welchem gerade ein Funke überspringt, als die Schlagweite bei der gegebenen Spannungsdifferenz. Je größer der Spannungsunterschied zweier Leiter ist, um so größer ist die Schlagweite. Man bedient sich zur Messung der Schlagweite am besten des Funkenmikrometers Fig. 290, welches zwei auf Glasfüßen stehende Kugeln besitzt, von denen die eine durch eine Mikrometerschraube gegen die andere verschoben werden kann. Die Kugeln werden mit den beiden Leitern verbunden. Der Abstand der beiden Kugeln, bei dem gerade ein Funke überspringt, gibt also auch ein

Maß für die Größe des Spannungsunterschieds, der zwischen ihnen herrscht. Sir W. Thomson (Lord Kelvin) hat zuerst die Spannungsdifferenz absolut in Volt gemessen, die zu bestimmten Schlagweiten gehört, und aus seinen Untersuchungen und denen anderer ergibt sich folgende Tabelle:

Schlagweite zwischen Kugeln	Spannungsdifferenz in Volt
0,5 mm	2910
1,0 „	4830
3,0 „	11460
6,0 „	20470
10,0 „	25410
15,0 „	29340
20,0 „	31350

Man sieht, daß schon eine Spannung von fast 3000 Volt nötig ist, um einen Funken von einem halben Millimeter Länge zu erzeugen, und daß mit der Größe der Schlagweite die zugehörige Spannungsdifferenz wächst. Die Luft setzt also dem Durchgang der Elektrizität einen sehr großen Widerstand entgegen, der nur durch sehr hohe Spannungen überwunden werden kann.

Zeigt die Luft nun dieses Verhalten unter allen Umständen? Man kann ja die Luft vermittels der Luftpumpen in einem Raum beliebig verdünnen; wird sich auch verdünnte Luft so verhalten? Diese Frage ist erst 1854 von Gassiot in Frankreich und ausführlicher 1858 von Plücker in Bonn experimentell genau untersucht worden. Letzterer hatte sich dabei der Hilfe des berühmten Glasbläsers Geißler in Bonn zu erfreuen, welcher durch seine Kunst die Versuche wesentlich erleichterte. Um Experimente mit verdünnter Luft anzustellen, muß man die Luft in Gefäße (Glasgefäße, wenn man etwas sehen will) einschließen und abschließen. Ein solches Gefäß wird mit der Luftpumpe verbunden, die Luft wird ausgepumpt bis zu einer Verdünnung, die man gerade will. Das Gefäß ist dann bis zu einem gewissen Grade evakuiert und wird sodann entweder durch einen Hahn von der Pumpe abgeschlossen oder abgeschmolzen. Will man ein Gefäß nicht mit Luft, sondern mit einem anderen Gas in verdünntem Zustand füllen, so muß man erst die Luft ganz auspumpen, dann das andere Gas einfüllen und dies durch Pumpen auf den gewollten Grad der Verdünnung bringen.

Bekanntlich wird der Druck eines Gases gemessen durch die Höhe einer Quecksilbersäule in Millimetern, welcher er das Gleichgewicht hält. Ein Gas unter dem Druck einer Atmosphäre, wie die Luft, die uns umgibt, hat einen Druck von 760 mm (Quecksilber) am Meeresniveau, auf höher gelegenen Orten einen kleineren. Ist also der Druck in einem Gefäß durch Evakuieren auf 1 mm erniedrigt, so ist nur noch der 760. Teil der Luftmenge im Gefäß, die ursprünglich darin war.

Um durch ein verdünntes Gas die Elektrizität hindurchsenden zu können, muß man in das Gefäß, welches das Gas enthält, zwei Drähte einführen (einschmelzen oder einkitten), welche mit der Elektrizitätsquelle verbunden werden können. Diese bezeichnet man auch hier als Elektroden und unterscheidet auch hier die positive Elektrode als Anode, die negative als Kathode. Die Elektroden können bloße Drähte

sein, oder es können Platten oder gekrümmte Flächen an den Drähten befestigt sein, je nach Bedarf. In Fig. 291 ist ein zugeschmolzenes Rohr abgebildet, in dessen beide Enden die Elektroden, und zwar eine Spitze und eine Platte, eingeschmolzen sind.

Wenn man nun in einem solchen Rohr die Luft mit der Luftpumpe allmählich verdünnt und die Elektroden des Rohres mit einer Elektrisiermaschine oder einem Hochspannungsakkumulator oder mit der sekundären Rolle eines Induktionsapparates verbindet, so findet man eine Reihe von merkwürdigen und zum Teil sehr schönen Erscheinungen. Wir wollen annehmen, daß die Entfernung der Elektroden so groß ist, daß in freier Luft bei der angewendeten Spannungsdifferenz kein Funke zwischen ihnen überspringt. Solange der Druck in der Röhre 760 mm beträgt, zeigt sich überhaupt nichts und es zeigt sich auch nichts, wenn man den Druck allmählich von 760 mm bis auf 10 mm verringert. Nur ganz schwache, bläuliche, kurze Strahlen sieht man etwa von 50 mm Druck an von den Elektroden ausgehen. Ist aber der geringe Druck von etwa 10 mm erreicht, so sieht man (Fig. 292) zwischen den beiden Elektroden ein helles, violettes Lichtband sich erstrecken, welches nicht die ganze Breite der Röhre ausfüllt, welches auch nicht ganz geradlinig verläuft, welches sich aber direkt von der einen Elektrode bis zur anderen hinzieht. Macht man den Druck noch geringer, 1—3 mm, so wird dieses violette Licht zwischen den Elektroden immer breiter, so daß es allmählich die ganze Breite der Röhre ausfüllt. Zugleich erkennt man, daß die *negative* Elektrode mit einem bläulichen Licht umgeben ist und daß das violette Licht nur bis nahe an dieses bläuliche Licht herankommt, aber doch von diesem noch durch einen kleinen *dunklen Zwischenraum* getrennt ist. Die leuchtende Entladung geht also von der positiven Elektrode aus, aber nicht ganz bis zur negativen Elektrode hin. Man nennt dieses helle, im Falle der Luft violette Licht das *positive Licht*, oder die positive Entladung. Das blaue Licht, welches an der Kathode auftritt, bedeckt zuerst, bei höheren Drucken, nicht die ganze Kathode, sondern tritt zunächst an einigen Punkten auf, bedeckt allmählich, wenn die Verdünnung des Gases fortschreitet, immer größere Teile der Kathode und endlich die ganze Kathode. Wenn nun gewisse Verdünnungen erreicht sind, die je nach der Form der Röhre und der

Fig. 291.



Fig. 292.

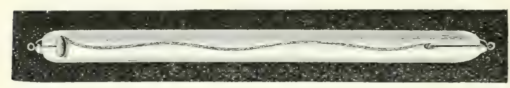
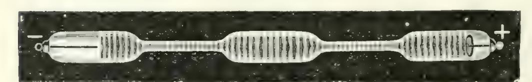
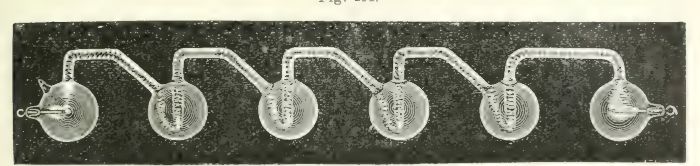


Fig. 293.



Lage und Art der Kathoden verschieden sind, erkennt man, daß das positive Licht geschichtet ist. Es sind auf der ganzen Länge der Röhre abwechselnd helle und dunkle Schichten in nahezu gleichem Abstand voneinander vorhanden. Fig. 293 sucht eine Darstellung der Erscheinung zu geben, wie sie in einer solchen Röhre sich zeigt. Röhren von sehr verschiedener, oft sehr kunstvoller Form, mit Gasen gefüllt, welche bis auf 1—3 mm Druck evakuiert sind, wurden zuerst von Geißler

Fig. 294.



in Bonn in den Handel gebracht und heißen deshalb Geißlersche Röhren. Durch die leuchtende verdünnte Luft geht die Entladung der Elektrizität vor sich. Ist das Rohr gebogen oder gekrümmt, wie in Fig. 294, so folgt die positive Entladung allen Krümmungen des Rohres und die Elektrizität geht auf ihnen durch die verdünnte Luft von der einen zur andern Elektrode über.

Die Farbe, in welcher das Gas leuchtet, ist verschieden, je nach der Natur der Gase. Wasserstoff, Stickstoff, Helium, Chlor u. s. w. in solche Röhren gebracht, leuchten anders als Luft, ja es ist sogar umgekehrt die Untersuchung dieser leuchtenden Gase in Geißlerröhren mit dem Spektroskop das sicherste Mittel, die Natur eines Gases zu erkennen.

Die brillante Helligkeit und Farbenpracht, die das positive Licht in Geißlerröhren zeigt, ist Veranlassung, daß man diese vielfach benutzt, um schöne glänzende Farbeneffekte hervorzubringen. So macht man für Ballettvorstellungen Diademe aus Glasröhren wie Fig. 295, die mit verschiedenen Gasen gefüllt sind, und die als Geißlerröhren wirken.

Fig. 295.

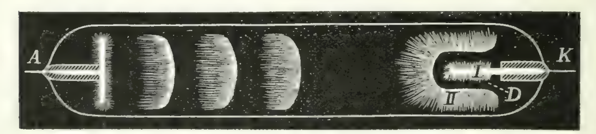


Die Lichterscheinung in einer Geißlerröhre ist aber bei genauerer Betrachtung etwas komplizierter, als sie zunächst erscheint. An der negativen Elektrode nämlich ist nicht, wie der erste Anschein glauben macht, bloß ein einfaches bläuliches Licht zu sehen, sondern es befinden sich vielmehr in der unmittelbaren Nähe dieser Elektrode drei getrennte Schichten. In Fig. 296 sind diese etwas übertrieben gezeichnet. Unmittelbar an der drahtförmigen Kathode K befindet sich eine leuchtende Schicht I, die gewöhnlich goldgelb erscheint. Man bezeichnet sie als erste Kathodenschicht. Von ihr durch einen schmalen dunklen Raum D getrennt, tritt dann das eigentliche bläuliche Licht II auf, welches man als zweite oder negative Kathodenschicht bezeichnet. Der Raum D zwischen ihnen wird Dunkelraum oder auch nach

seinem Entdecker Hittorfscher Dunkelraum genannt. Diese drei Schichten zusammen, I, D und II, bezeichnet man als negatives Glimmlicht. An die zweite Kathodenschicht II schließt sich nun der dunkle Zwischenraum an, der das negative Glimmlicht von dem positiven Licht, das in Fig. 296 geschichtet ist, trennt und den man auch den Faradayschen Dunkelraum nennt.

Die Geißlerröhren enthalten, wie gesagt, Luft oder andere Gase in einer solchen Verdünnung, daß sie ungefähr 1—3 mm Druck zeigen. Geht man nun mit der Evakuation solcher Röhren weiter, so bleiben die Erscheinungen zunächst im wesentlichen die gleichen. Die erste Folge des Weiterpumpens ist nur die, daß der Faradaysche dunkle Zwischenraum zwischen der Kathode und dem positiven Licht an Ausdehnung zunimmt. Man kann beim Pumpen direkt verfolgen, wie dieser dunkle Zwischenraum, der zuerst kaum 1 mm lang war, sich vergrößert, auf 5, 10, 20 mm wächst, wenn man die Evakuation bis auf Bruchteile eines Millimeters Druck fortsetzt. Die Röhre bleibt also in der Nähe der Kathode immer noch mit bläulichem Licht bedeckt, während an der

Fig. 296.



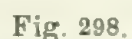
Anode das positive Licht sich weniger weit von ihr aus in das Rohr hinein erstreckt. Dieser dunkle Zwischenraum wächst also durch fortgesetzte weitere Verdünnung immer mehr. Daher verliert eine solche Röhre bei weiterer Evakuation immer mehr an Brillanz, indem das positive Licht nur einen kleinen Teil der Röhre ausfüllt und auch in der Helligkeit und Farbe verblaßt. Auch die Schichtungen hören auf. Durch fortgesetztes Evakuieren kann man schließlich erreichen, daß der dunkle Zwischenraum die Röhre ganz erfüllt, bis nahe an die Anode, daß also das positive farbige Licht bis auf einen kleinen Rest ganz verschwunden ist. Aber gleichzeitig mit dieser wachsenden Ausdehnung des dunklen Zwischenraumes geht eine andere Erscheinung vor sich, die zum ersten Male von Hittorf 1869 beobachtet wurde.

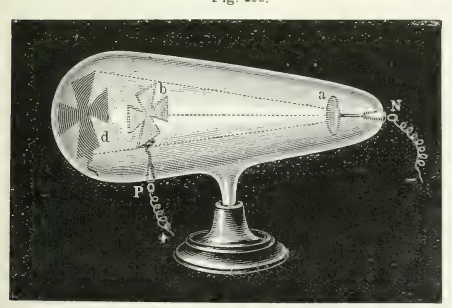
Von der negativen Elektrode, der Kathode aus, fangen nämlich bei diesen großen Verdünnungen an Strahlen auszugehen, welche das Glas der Röhre da, wo sie es treffen, zum hellen Leuchten (Phosphoreszieren) anregen. Die Gläser, welche in Deutschland zu diesen Röhren genommen werden, leuchten gewöhnlich grün, andere (englische) Gläser leuchten blau, didymhaltige Gläser leuchten rot. Man bekommt also die merkwürdige Erscheinung, daß zwar das Innere der Röhre bei fortgesetzter Evakuation allmählich ganz lichtlos wird, daß dagegen das Glas der Röhre selbst hellgrün posphoresziert. Die hellste Phosphoreszenz zeigt sich gerade an derjenigen Stelle des Glases, welche der Kathode gegenüberliegt. Macht man durch Umkehrung des Stromes die andere Elektrode

zur Kathode, so wird die dieser gegenüberliegende Glasstelle am lebhaftesten zur Phosphoreszenz erregt. Diese Erscheinung läßt sich am leichtesten so auffassen, und diese Auffassung wird durch alles folgende bestätigt, daß von der Kathode aus Strahlen ausgehen, die, wo sie auf das Glas fallen, dieses zur Phosphoreszenz bringen, die aber selbst im Innern der Röhre nicht oder nur schwach sichtbar sind. Diese Strahlen bezeichnet man als *Kathodenstrahlen*. Nachdem Hittorf sie entdeckt hatte, erregten sie lange keine besondere Beachtung, bis *Crookes* 1879 die Aufmerksamkeit von neuem auf sie lenkte und durch die Herstellung von zweckmäßig geformten und genügend evakuierten Röhren, die man nach ihm *Crookessche Röhren* nennt, die Versuche mit Kathodenstrahlen wesentlich erleichterte. In den Crookesschen Röhren ist die Luft sehr weit evakuiert, ungefähr bis auf $^1/_{1000}$ mm Druck, während, wie gesagt, die Geißlerröhren einen Druck von ungefähr 1 mm besitzen.

Fig. 297.

Die Kathodenstrahlen besitzen nun eine Reihe sehr merkwürdiger Eigenschaften. Zunächst nämlich gehen sie immer *senkrecht zur Kathode* fort, ganz unabhängig davon, wo die Anode sich befindet. Sie kümmern sich um die Anode gar nicht. Man kann die Anode der Kathode gegenüberstellen, oder sie seitlich von ihr lassen, oder sie hinter die Kathode stellen, oder sie als Ring die Kathode umgeben lassen, immer gehen die Kathodenstrahlen unabhängig davon denselben Weg, nämlich senkrecht zur Kathode fort. Da also von jedem Flächenstück auf der Kathode die Strahlen senkrecht fortgehen, so ist es möglich, die Kathodenstrahlen in einem *Brennpunkt* zu konzentrieren. Wird nämlich als Kathode nicht eine ebene Metallscheibe genommen, sondern ein hohlspiegelförmiges Metallstück wie bei K in Fig. 297, so müssen die Strahlen von ihr aus sich in einem Brennpunkt vereinigen und dann auseinandergehen. Es ist nun ganz gleichgültig, ob der positive Pol mit a, oder mit a′ oder mit a″ verbunden wird, immer sieht man die Glaswand an der der Kathode gegenüberliegenden Stelle S am hellsten phosphoreszieren.


Fig. 298.

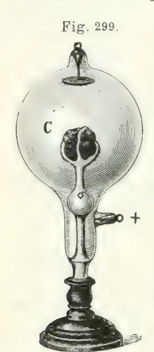


Der schärfste Beweis dafür, daß die Kathodenstrahlen sich ganz geradlinig ausbreiten, ist von Crookes durch einen Apparat, wie Fig. 298, geliefert worden. Dieser Apparat zeigt nämlich, daß wenn man einen

undurchsichtigen Körper, ein Metallkreuz b, in den Weg der Kathodenstrahlen stellt, daß dieser dann einen scharfen Schatten wirft. In der Röhre ist bei a die Kathode, bei P die Anode. Die Kathodenstrahlen, die von a ausgehen, erregen die gegenüberliegende Wand zu heller Phosphoreszenz, überall wo sie sie treffen. Wo aber die Kathodenstrahlen durch das Kreuz abgefangen sind, bleibt die Glaswand dunkel. Man sieht daher ein dunkles Kreuz d auf grünem Grunde an der Glaswand.

Eine zweite Eigenschaft der Kathodenstrahlen besteht darin, daß sie nicht bloß das Glas der Röhre, sondern überhaupt jeden (unmetallischen) Körper, auf den sie treffen, zur Phosphoreszenz bringen. Es werden, um dieses zu zeigen, nach dem Vorgang von Crookes vielfach Röhren verfertigt, in deren Innerem verschiedene Mineralien so eingeschlossen sind, daß sie von den Kathodenstrahlen getroffen werden. So zeigt Fig. 299 eine Crookessche Röhre, in welcher in der Mitte bei c ein Mineral, sagen wir ein Stück Tropfstein, befestigt ist. Die Kathodenstrahlen, die von der Kathode oben ausgehen, bringen den Stein zu heller blaurosa Phosphoreszenz. Die Phosphoreszenzfarbe hängt allein ab von der Natur des bestrahlten Körpers; manche Körper leuchten blau, andere rot, violett, grün, und man erhält auf diese Weise prachtvolle glänzende Farbenerscheinungen. Auch chemische Wirkungen haben die Kathodenstrahlen. Photographische Platten, die den Kathodenstrahlen ausgesetzt werden (im Innern der Röhre), werden geschwärzt, und zwar in fast unmeßbar kurzer Zeit. Legt man auf die Platte etwa Metallbuchstaben, durch die die Kathodenstrahlen abgefangen werden, so bekommt man ein Bild dieser Buchstaben auf der Platte (im Negativ helle Buchstaben auf schwarzem Grund, im Positiv umgekehrt).

Fig. 299.

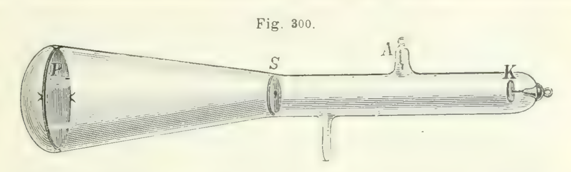


Die Kathodenstrahlen, das ist eine dritte Eigenschaft derselben, erhitzen die Stellen, auf welche sie auftreffen, im allgemeinen sehr stark. So wird das Glas der Crookesschen Röhren an den Stellen, wo es getroffen wird, rasch warm und kann so heiß werden, daß es erweicht und vom Luftdruck durchbrochen wird. Metallbleche, die im Innern der Röhre den Kathodenstrahlen ausgesetzt werden, fangen an, rot zu glühen, bei stärkerem Strom werden sie sogar weißglühend und schmelzen endlich fort.

Eine vierte Eigenschaft der Kathodenstrahlen, eine der merkwürdigsten, ist ebenfalls, wie die bisherigen, schon von Hittorf gefunden. Die Kathodenstrahlen werden durch den Magneten sehr leicht abgelenkt. Bringt man in die Nähe einer von Kathodenstrahlen erfüllten Röhre einen Magneten, so kann man die Strahlen ablenken, wohin man will. Man sieht, wenn man den Magneten hin und her bewegt, die Phosphoreszenz des Glases bald an der einen Stelle, bald an einer anderen Stelle aufleuchten und mit der Bewegung des Magneten selbst wandern. Da ein Kathodenstrahl keine merkliche Masse besitzt, so folgt er den magnetischen Kräften, die auf ihn wirken, sofort, ohne Verzögerung. Die magnetische Ablenkung der Kathodenstrahlen kann

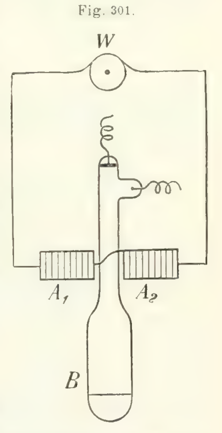
man am übersichtlichsten erkennen und auch quantitativ messen, wenn man eine Röhre von der Form der Fig. 300 benutzt, die von Braun konstruiert wurde und die man die Braunsche Röhre nennt. Von der Kathode K gehen die Kathodenstrahlen geradlinig aus (A ist die Anode). Durch den Metallschirm S, der ein kleines Loch enthält, werden aber die meisten Kathodenstrahlen aufgehalten und nur ein schmales Bündel fällt

Fig. 300.



durch das Loch auf den phosphoreszierenden Schirm P, der am Ende der Röhre angebracht ist, und erzeugt auf dieser einen blauleuchtenden kreisförmigen Fleck. Bringt man nun in die Nähe von S einen Magnetstab, so verschiebt sich der Fleck, je nach der Stellung und der Art des genäherten Magnetpols, nach rechts oder links, nach oben oder unten. Die Richtung der Ablenkung des Kathodenstrahls ist immer durch die Linke-Hand-Regel (S. 182) bestimmt, wenn man als Richtung des Stromes nicht die Richtung des Kathodenstrahls (von der Kathode fort), sondern die entgegengesetzte (zur Kathode hin) einführt. Man hat also den Zeigefinger der linken Hand in die Richtung der magnetischen Kraftlinien, den Mittelfinger in die Richtung des Kathodenstrahls zur Kathode hin zu legen, dann gibt der Daumen die Richtung, nach welcher der Strahl abgelenkt wird.

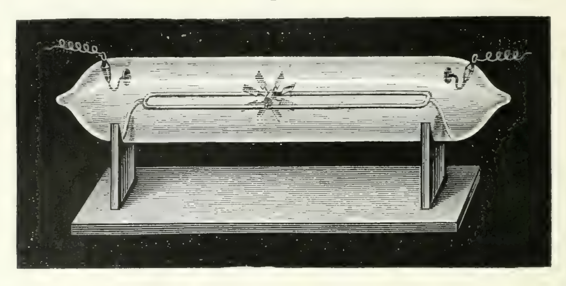
Fig. 301.



Da die Ablenkung des Kathodenstrahls sofort der einwirkenden magnetischen Kraft folgt, weil er eben keine merkliche Masse besitzt, so kann man auch rasch wechselnde magnetische Kräfte anwenden und die Ablenkung des Kathodenstrahls wechselt dann ebenso rasch. Bringt man daher in die Nähe von S einen Stab aus weichem Eisen, um den man Wechselströme herumsendet, so bewegt sich der Fleck in derselben Periode, die der Wechselstrom besitzt, nach der einen und der anderen Seite. Die Art der Anordnung der Braunschen Röhre zur Untersuchung von Wechselströmen und von elektrischen Schwingungen geht aus Fig. 301 hervor. Die Röhre B befindet sich zwischen zwei Spulen A_1 A_2, welche mit Eisenkernen versehen sind (bei starken Strömen können die Eisenkerne fortbleiben). Durch eine Wechselstromquelle W werden Wechselströme in dem Kreis erzeugt, welche nun den Lichtfleck auf dem Schirm der Röhre hin und her ablenken. In einem rotierenden Spiegel, in dem das Bild des Flecks beobachtet wird, sieht man eine blauleuchtende Kurve, welche die Form des Wechselstromes darstellt.

Endlich eine fünfte Eigenschaft der Kathodenstrahlen wurde nicht von Hittorf, sondern erst von Crookes entdeckt. Diese Strahlen üben nämlich mechanische Wirkungen auf leicht bewegliche Körper aus. In einer Röhre, wie Fig. 302, ist ein leicht bewegliches Flügelrad auf

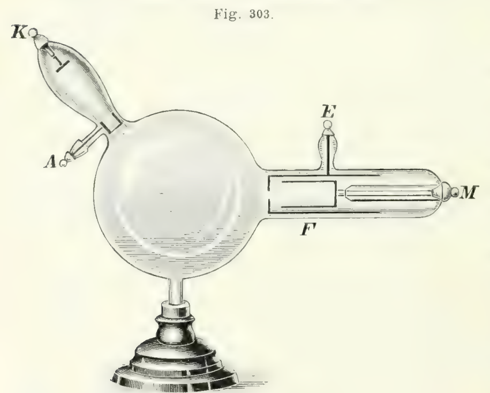
Fig. 302.



zwei Glasschienen verschiebbar angebracht. Läßt man die Entladung durch die Röhre gehen, so treffen die Kathodenstrahlen oben auf die Flügel, drehen diese und treiben das Rädchen auf der Bahn fort. Bei Umkehrung des Stromes kehrt sich auch die Bewegung des Rädchens um, falls beide Elektroden symmetrisch angebracht sind, wie in der Figur.

Eine wichtige neue Tatsache, die sechste Eigenschaft dieser Strahlen, wurde erst viel später von einem französischen Forscher Perrin einwandfrei festgestellt. Jeder Körper, der von Kathodenstrahlen getroffen wird, wird negativ elektrisch. Die Strahlen verhalten sich so, als ob sie negative Elektrizität mit sich führen. Um das nachzuweisen, kann man sich einer Röhre wie der in Fig. 303 bedienen.

Fig. 303.



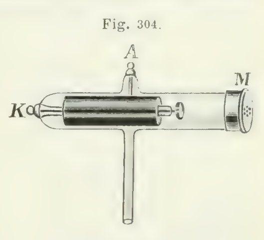
In dieser Röhre ist die Kathode bei K, die Anode bei A. Die Anode ist ein hohler Metallzylinder, der an der Unterseite ein kleines Loch der Kathode gegenüber besitzt, so daß nur ein schmales Bündel von Kathodenstrahlen in das Glasgefäß dringt und auf der gegenüberliegenden Wand einen Phosphoreszenzfleck erregt. In dem Ansatzrohr ist nun weiter ein

Apparat angebracht, den man einen Faradayschen Käfig nennt. Er besteht aus zwei konzentrischen Metallzylindern, von denen der eine, äußere, bei E mit der Erde verbunden wird, während der innere wohl isoliert ist und zur Klemme M führt, an die ein Elektroskop oder ein Elektrometer angelegt wird. Der äußere Zylinder hat an der Grundfläche ein Loch, durch welches die Strahlen in den inneren Zylinder eindringen können. Wenn man nun die Kathodenstrahlen erzeugt, so gehen sie zunächst, wegen der Lage der Kathode, nicht in den Käfig hinein und das Elektroskop macht keinen Ausschlag. Wenn man aber durch einen Magneten die Kathodenstrahlen so von ihrer ursprünglichen Richtung ablenkt, daß sie in den Käfig hineindringen, so macht das Elektroskop sofort kräftige Ausschläge und die Prüfung derselben zeigt, daß es negativ geladen ist.

Die Kathodenstrahlen führen also negative Ladung mit sich.

Lange Zeit schienen die Kathodenstrahlen, so wunderbare Eigenschaften sie auch besitzen, doch kaum mehr als ein Kuriosum zu sein. Sie schienen in die hoch evakuierte Röhre eingeschlossen sein zu müssen und es schien nichts von ihnen nach außen zu dringen. In der Röhre selbst werden die Strahlen schon durch dünne Schichten von Körpern aufgehalten. Eine dünne Glasplatte, in ihren Weg gestellt, phosphoresziert auf der getroffenen Seite, läßt aber nichts von den Strahlen hindurch. So läßt auch die Glaswand der Röhre nichts von den Kathodenstrahlen nach außen dringen. Sie phosphoresziert inwendig, und die ganze Energie der Kathodenstrahlen scheint zur Erzeugung dieser Phosphoreszenz und zur Erhitzung der Glaswand verbraucht zu werden. Es wurde nun aber durch eine Beobachtung von Hertz, der in diesem Gebiet wie in so vielen anderen befruchtend gewirkt hat, gezeigt, daß durch äußerst dünne Schichten von Aluminium die Kathodenstrahlen hindurchgehen. Auf Grund dieser Beobachtung gelang es Lenard, indem er in die Glaswand ein kleines Stück von Aluminiumfolie einsetzte, die Kathodenstrahlen aus der Röhre hinaus in die Atmosphäre treten zu lassen. Eine derartige Lenardsche Röhre zeigt Fig. 304. Ein Glasrohr, das an die Luftpumpe angesetzt werden kann, enthält eine Kathode K im Innern und eine Anode A, die zylinderförmig gestaltet ist. Das eine Ende des Rohres ist durch eine Messingkappe M abgeschlossen und in dieser befinden sich einige kleine Löcher, über welche ein Stück dünne Aluminiumfolie befestigt ist. Dieses dünne Aluminium ist nun ein Fenster, durch welches die Kathodenstrahlen aus der Röhre hinaus in die Luft dringen können. Es ergab sich dabei die neue Tatsache, daß die Kathodenstrahlen auch in dichter Luft bestehen können, während sie nur in sehr verdünnter Luft entstehen können. Lenard zeigte weiter, daß die Kathodenstrahlen auch außerhalb der Röhre Körper zum Fluoreszieren erregen und photographische Platten belichten können. Er hatte schon bei seinen Kathodenstrahlen die wesentlichsten Eigenschaften beobachtet, die später

Fig. 304.



bei den Röntgenstrahlen großes Aufsehen erregten. Die Versuche von Lenard zeigten auch unter anderem deutlich, was schon vorher von Hertz ausgesprochen war, daß es in einer Röhre Kathodenstrahlen verschiedener Art gibt, die von dem Magneten verschieden stark abgelenkt werden, vergleichbar mit den Lichtstrahlen verschiedener Farbe, die von einem Prisma verschieden stark gebrochen werden.

Welches ist nun die Natur dieser so merkwürdigen Strahlen, wie sind ihre so auffallenden Eigenschaften zu erklären, Eigenschaften, die in manchen Punkten denen der Lichtstrahlen ähnlich, in anderen aber wieder vollkommen abweichend von diesen sind?

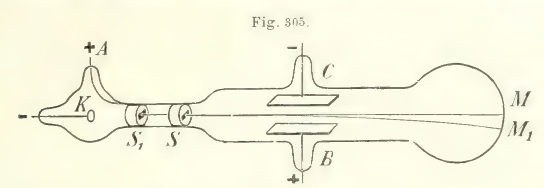
Crookes hatte zuerst schon von ihnen eine Erklärung gegeben, die tatsächlich vieles verständlich machte, aber nicht alles. Crookes meinte, daß diese Strahlen darin beständen, daß von der Kathode aus kleine Teilchen fortgeschleudert würden, entweder die Teilchen der noch vorhandenen Gase oder Teilchen der Kathode selbst, oder vielleicht auch elektrolytische Bestandteile der Gasmoleküle. Durch diese Hypothese ließ sich die geradlinige Ausbreitung leicht erklären. Auch daß die Strahlen Phosphoreszenz erregen, wo sie auftreffen und daß sie die getroffenen Körper erhitzen, läßt sich leicht einsehen. Durch das Bombardement der Teilchen kommen die getroffenen Moleküle der Glaswand oder der eingeschmolzenen Körper in Erzitterungen und senden dadurch das ihnen eigentümliche Phosphoreszenzlicht aus. Ebenso wird durch den Anprall der bewegten Teilchen Wärme erzeugt. Auch die Bewegung leichter Körper ließ sich durch den Anprall der Teile erklären. Was sich aber durch diese Hypothese nicht erklären ließ, war zunächst die Eigenschaft der Strahlen, daß sie von einem Magneten abgelenkt wurden. Wie sollte ein Magnet auf bewegte Gasteilchen wirken? Und ebensowenig lassen sich durch die einfache Crookessche Hypothese die negativen Ladungen erklären, die die Kathodenstrahlen zeigen.

Durch eine einzige Änderung aber wird diese Theorie allen Erscheinungen gerecht und diese Änderung hat die moderne Forschung vorgenommen.

Man nimmt nämlich jetzt an, und zwar wegen der oben angeführten sechsten Eigenschaft dieser Strahlen, daß es negativ geladene kleine Massen sind, und zwar, wie sich zeigen wird, die negativen Elektronen selbst, welche sich rasch in der Richtung der Strahlen geradlinig von der Kathode fortbewegen. Durch diese Annahme läßt sich ohne weiteres einsehen, daß jedes Metallblech, jeder Körper, der von den Kathodenstrahlen getroffen wird, negativ elektrisch werden muß. Wenn aber die Kathodenstrahlen aus bewegten elektrischen Massenteilchen bestehen, so müssen sie auch durch elektrostatische Kräfte abgelenkt werden. Läßt man also Kathodenstrahlen in der Röhre durch den Zwischenraum zwischen zwei Metallplatten gehen, von denen die eine positiv, die andere negativ geladen ist, so müssen die negativen Teilchen sich zur positiven Platte hinbiegen, vermöge der elektrostatischen Anziehungskräfte, was sie auch tun. In Fig. 305 ist eine Anordnung dazu gezeichnet. Eine Braunsche Röhre enthält bei K die Kathode, bei A die Anode. Die Kathodenstrahlen gehen von K aus durch zwei Schlitze in den Metallschirmen S^1 und S und ein schmales Bündel derselben gelangt

in den Raum zwischen den zwei Kondensatorplatten B und C, welche in die Röhre eingeschmolzen sind und von denen C mit dem negativen, B mit dem positiven Pol einer Batterie von Akkumulatoren verbunden ist. Der Strahl, der ohne Erregung des Kondensators nach M fiel, fällt nun nach M_1, wird also abgelenkt. Wir können diesen Versuch auch quantitativ etwas näher verfolgen. Es möge ein solches fliegendes Elektron mit einer gewissen Masse verbunden sein. Je größer nun die lebendige Kraft jedes Teilchens, d. h. das halbe Produkt aus seiner Masse und dem Quadrat seiner Geschwindigkeit ist, um so weniger wird es durch das elektrostatische Feld abgelenkt. Andererseits aber, je größer die elektrische Ladung jedes Teilchens ist, um so mehr muß es unter sonst gleichen Um-

Fig. 305.



ständen abgelenkt werden. Die Größe der Ablenkung hängt also ab einerseits von dem Quadrat der Geschwindigkeit der Teilchen (sie ist diesem Quadrat umgekehrt proportional), andererseits von dem Verhältnis der Elektrizitätsmenge, der Zahl der Coulomb, die jedes Teilchen mit sich führt, zu der Masse desselben, der Anzahl der Gramme.

Durch diese Annahme bewegter Elektronen wird aber auch erklärt, daß die Kathodenstrahlen durch den Magneten abgelenkt werden. In der Tat repräsentieren ja elektrisch geladene Teilchen, die mit einer gewissen Geschwindigkeit sich fortbewegen, einen elektrischen Strom. Denn die Stromstärke ist gleich der pro Zeiteinheit durch jeden Querschnitt hindurchgehenden Elektrizitätsmenge, hängt also hier ab von der Elektrizitätsmenge jedes Teilchens und seiner Geschwindigkeit. Und da ein Strom, wie wir wissen, in einem magnetischen Felde von Kräften angegriffen und bewegt wird (nach der Linken-Hand-Regel), so müssen auch die bewegten Teile in den Kathodenstrahlen von magnetischen Kräften angegriffen werden, womit die magnetische Ablenkbarkeit der Strahlen erklärt ist und auch erklärt ist, warum wir bei der Anwendung der Linken-Hand-Regel den Mittelfinger nicht in die Richtung des Kathodenstrahls, sondern in die entgegengesetzte Richtung bringen müssen (S. 305), da eben negative Teilchen sich im Strahl bewegen. Je größer die lebendige Kraft, um so geringer, je größer die Stromstärke, d. h. das Produkt aus Ladung und Geschwindigkeit ist, um so größer muß die Ablenkung sein. Man sieht, daß die magnetische Ablenkung einerseits von der Geschwindigkeit (nicht von deren Quadrat) abhängt (ihr umgekehrt proportional ist), andererseits aber auch wieder von dem Verhältnis der Zahl der Coulomb zu der Zahl der Gramme jedes Teilchens abhängt.

Die Annahme rasch bewegter Teilchen, die negativ geladen sind, erklärt also alle Erscheinungen der Kathodenstrahlen. Ja noch mehr.

Wenn man die elektrostatische Ablenkung und die magnetische Ablenkung, die durch bekannte elektrostatische resp. magnetische Kräfte hervorgebracht werden, messend verfolgt, so kann man nach dem Gesagten daraus entnehmen, erstens, welche Geschwindigkeit diese Teilchen haben, und zweitens, wie groß die Zahl der Coulomb ist, die ein solches Teilchen pro Gramm mit sich führt. Diese letztere Größe nennt man die spezifische Ladung der Teilchen. Solche Messungen sind in der Tat ausgeführt worden und haben zu höchst überraschenden Resultaten geführt. Sie haben erstens ergeben, daß die Geschwindigkeit der Teilchen in den Kathodenstrahlen eine sehr große ist. Sie ist in stärker evakuierten Röhren größer als in weniger evakuierten und erreicht in den ersteren Werte bis zu einem Drittel der Lichtgeschwindigkeit, eine ganz enorme Geschwindigkeit, die weitaus alles übertrifft, was sonst in der Natur an Geschwindigkeiten bewegter Massen zu finden ist. Zweitens aber ergab sich, daß jedes Gramm dieser Teilchen eine Ladung von etwa 170 Millionen Coulomb besitzen müsse. Da wir nun aus der Elektrolyse wissen (S. 145), daß ein Gramm Wasserstoff nur 96 540 Coulomb mit sich führt, so folgt daraus, daß die spezifische Ladung der Teilchen hier ca. 2000mal so groß ist, wie bei den elektrolytischen Flüssigkeiten. Das könnte einerseits darauf beruhen, daß hier bei den Gasen die bewegten Teile ebenfalls Ionen sind, wie bei der Elektrolyse, nämlich geladene Atome, aber daß diese Atome hier mit viel, 2000mal, größeren Ladungen verbunden sind, wie bei der Elektrolyse, eine Annahme, die von J. J. Thomson durch geniale Experimente widerlegt wurde. Oder es kann darauf beruhen, daß die geladenen Teilchen hier bei derselben Ladung, wie bei der Elektrolyse eine sehr viel kleinere Masse, etwa den zweitausendsten Teil besitzen als die Atome des Wasserstoffs. Diese zweite Annahme hat sich bestätigt. Und da sich ferner gezeigt hat, daß hier bei den Kathodenstrahlen die spezifische Ladung ganz unabhängig davon ist, welches Gas in dem Rohre sich befindet, ob Luft oder Sauerstoff oder Stickstoff oder Wasserstoff oder Helium u. s. w., so hat man daraus den Schluß gezogen, daß es in den Kathodenstrahlröhren die kleinsten Teilchen der negativen Elektrizität, die negativen Elektronen selbst sind, welche sich bewegen. Bei der Elektrolyse fanden wir immer, daß die Elektronen mit den Atomen der körperlichen Materie verbunden sind und sich nur mit diesen bewegen. Hier in den sehr verdünnten Gasen können sich aber die Elektronen frei von der Materie bewegen und da sie so sehr kleine Massen besitzen und in der Röhre starke elektrische Kräfte vorhanden sind, so bekommen sie dadurch die erwähnten großen Geschwindigkeiten.

Man muß natürlich fragen, wenn in den Kathodenstrahlen die negativen Elektronen sich bewegen, wo sind dann die positiven Elektronen? Denn da das Gas vor dem Durchgang des Stromes unelektrisch ist, so müssen außer den negativen auch positive Teilchen vorhanden sein. In der Tat bewegen sich in einer solchen evakuierten Röhre auch positiv geladene Teile. Während aber die negativen Teilchen von der Kathode fortfliegen, müssen umgekehrt positive Teilchen auf die Kathode zufliegen. Am einfachsten findet man daher die positiven Teilchen, wenn man die Kathode einer Röhre mit Löchern, Kanälen versieht. Wenn dann ein Strom hin-

durchgesendet wird und die Kathodenstrahlen von der Kathode nach der einen Seite der Röhre geradlinig ausgehen (nach derjenigen Seite, an welcher die Anode sich befindet), so findet man, daß von den Löchern aus nach der anderen Seite der Röhre sich auch schwach leuchtende strahlenartige Gebilde ausbreiten, die von Goldstein entdeckt wurden und die man eben wegen dieser Kanäle Kanalstrahlen nennt. Fig. 306 zeigt eine solche Kanalstrahlenröhre. Man sieht in der Röhre eine scheibenförmige Elektrode K. mit Schlitzen versehen. Diese wird zur Kathode gemacht. Die Anode befindet sich rechts. Von der Kathode aus gehen dann die Kathodenstrahlen in der Röhre nach unten, in denjenigen Raum, in welchem sich die Anode befindet. Dagegen sieht man durch die Schlitze rosa gefärbte Strahlen nach oben in die Röhre gehen. Dies sind die Kanalstrahlen. Diese lassen sich durch den Magneten viel schwächer ablenken als die Kathodenstrahlen, aber sie werden gerade nach der entgegengesetzten Richtung abgebogen wie jene, woraus eben folgt, daß sie positive Ladung besitzen. Man hat nach derselben Methode, wie bei den Kathodenstrahlen, auch ihre Geschwindigkeit und ihre spezifische Ladung experimentell zu bestimmen vermocht und es hat sich ergeben, daß sie sehr viel geringere Geschwindigkeiten besitzen wie die Kathodenstrahlen und daß ihre spezifische Ladung ungefähr dieselbe ist wie bei der Elektrolyse, daß also ihre Masse bei gleicher Ladung ungefähr ebenso groß oder größer ist wie die Masse eines Wasserstoffatoms. Während also die negativen Elektronen sich frei von Materie für sich bewegen können, scheinen die positiven Elektronen auch hier in verdünnten Gasen noch immer mit größeren Massen fest verbunden zu sein. Gerade wegen dieser großen Masse, mit der sie belastet sind, ist ihre Geschwindigkeit eine viel geringere als die der Kathodenstrahlen. Man muß deshalb besser sagen, daß in den Kanalstrahlen positive Ionen, nicht positive Elektronen sich bewegen.

Fig. 306.

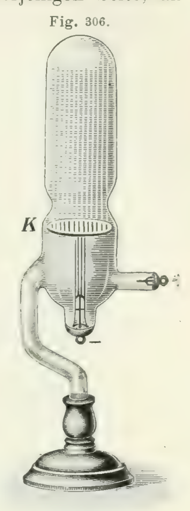
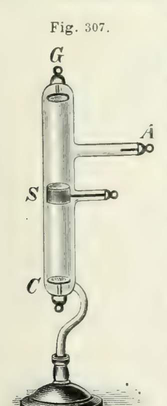


Fig. 307.

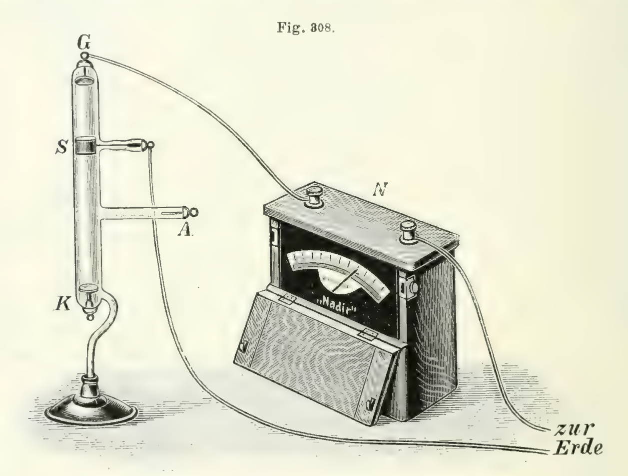


Den Unterschied zwischen Kanalstrahlen und Kathodenstrahlen kann man dadurch deutlich sichtbar machen, daß die beiden Strahlenarten unter Umständen verschiedenfarbige Fluoreszenz erregen. Chlorlithium wird z. B., wenn es von Kathodenstrahlen getroffen wird, blau leuchtend, während es, wenn es von Kanalstrahlen getroffen wird, rot fluoresziert. In der Röhre Fig. 307 befindet sich bei C eine mit Chlorlithium bestrichene Glimmerscheibe. Bei S ist eine siebförmige Elektrode, bei A und G sind andere Elektroden eingeschmolzen. Macht man G zur Kathode

und A zur Anode, so gehen die Kathodenstrahlen von G nach unten, gehen durch das Sieb hindurch und erregen das Chlorlithium zu blauem Leuchten. Macht man dagegen S zur Kathode und immer noch A zur Anode, so gehen die Kathodenstrahlen von S nach oben, die Kanalstrahlen von S nach unten, treffen das Chlorlithium und erregen es zu rotem Leuchten.

Man kann mit einer ähnlich gestalteten Röhre (ohne die Chlorlithiumscheibe C) auch die negative Ladung, welche die Kathodenstrahlen, und die positive Ladung, welche die Kanalstrahlen mit sich führen, sehr bequem durch ein empfindliches Galvanometer konstatieren. Dazu dient die Anordnung Fig. 308. Die Röhre enthält wieder bei S eine siebartig durchlochte Metallplatte. Wenn man diese mit der Erde verbindet, A zur Anode, K zur Kathode macht, so gehen die Kathodenstrahlen von K nach oben, gehen durch das Sieb hindurch und fallen auf die Platte G.

Fig. 308.

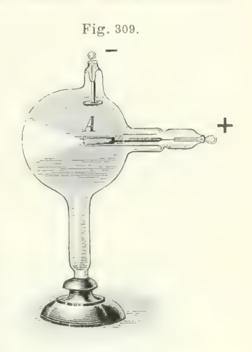


Verbindet man nun G mit einem empfindlichen Galvanometer N, z. B. dem Nadirinstrument (S. 190), und leitet dessen anderen Pol zur Erde ab, so gehen die negativen Teilchen durch den Galvanometerdraht und das Galvanometer zeigt einen Strom, dessen negativer Pol der mit G verbundene ist. Wenn man aber andererseits den negativen Pol des Induktoriums mit S verbindet (während S zugleich mit der Erde verbunden bleibt), so gehen von S die Kathodenstrahlen nach unten, die Kanalstrahlen nach oben und das mit G verbundene Galvanometer zeigt einen Strom der entgegengesetzten Richtung an.

Es ist höchst auffallend, daß die positiven Strahlen, die Kanalstrahlen sich so wesentlich von den Kathodenstrahlen unterscheiden, daß in den letzteren unzweifelhaft die negativen Elektronen frei auftreten, während die positiven Elektronen bei den Kanalstrahlen immer mit Materie verbunden sind. Man muß daher die Frage stellen, gibt es überhaupt positive

Elektronen in dem Sinne, wie es negative Elektronen gibt? Ist die positive Elektrizität auch ein besonderer Stoff, der in Atome geteilt ist, oder ist das, was wir positive Elektrizität nennen, eine Eigenschaft, die der gewöhnlichen Materie unter gewissen Umständen anhaftet? Um diese Frage sicher in dem ersten Sinne zu entscheiden, müßte man irgendwelche Vorgänge beobachten können, in denen die positiven Elektronen ohne Verbindung mit Materie auftreten können. Aber das ist bisher noch in keinem Falle gelungen und der Zweifel ist sehr berechtigt, ob es überhaupt gelingen kann. Man kann die positiven Ionen noch in anderer Art, als es bei den Kanalstrahlen der Fall ist, zwingen, Strahlen zu bilden. G e h r k e und R e i c h e n h e i m haben Röhren konstruiert, in denen von der A n o d e aus Strahlen fortgehen, die man A n o d e n s t r a h l e n nennt. Eine solche Röhre zeigt Fig. 309. Als Anode A ist in diese ein Glasröhrchen eingeschmolzen, welches ein Metallsalz enthält, Jodlithium oder -strontium, -calcium, -natrium. Die Kathode ist oben. Verbindet man die Elektroden mit einem Induktionsapparat, so gehen von der Anode aus Teilchen strahlenförmig fort, wie es der weiße Kegel in der Figur andeutet, und zwar sind diese Strahlen gefärbt, bei dem Lithiumsalz rot, bei dem Natriumsalz gelb, bei den beiden anderen Salzen auch rosa und rot. Diese Strahlen enthalten positive Teilchen. Wenn man aber ihre magnetische und elektrostatische Ablenkung untersucht, so findet man, daß die positiven Teilchen spezifische Ladungen besitzen, wie die Ionen bei der Elektrolyse, daß es sich also nicht um Elektronen, sondern um Ionen handelt. Also weder bei den Kanalstrahlen, noch bei den Anodenstrahlen, noch sonst irgendwo lassen sich positive Elektronen auffinden.

Fig. 309.

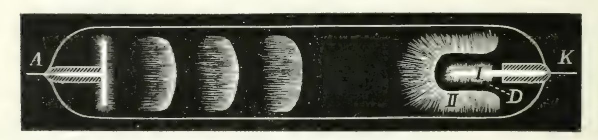


Wenn man so unzweifelhaft negative und positive Ladungen in den verdünnten Gasen, die von einem Strom durchflossen sind, findet und die Erscheinungen der Kathodenstrahlen und Kanalstrahlen durch sie erklären kann, so liegt die Vermutung nahe, daß auch die wunderbaren Erscheinungen in den Geißlerröhren sich auf ähnliche Weise werden verständlich machen lassen. In der Tat gelingt das auch, wenn man noch e i n e Annahme hinzufügt, die an sich sehr plausibel ist und die wir weiter unten direkt beweisen werden. Wenn nämlich negative Elektronen oder positive Ionen irgendwie in dem Gase erzeugt sind, so müssen die ersteren von der Kathode fort-, die letzteren zur Kathode hinfliegen und zwar wird ihre Geschwindigkeit um so größer sein, je größer die elektrischen Kräfte sind, die auf sie wirken. Fliegen nun solche Teile durch das Gas, so werden sie häufig Gasmoleküle treffen, diese anstoßen und erschüttern, und es wird die Möglichkeit vorliegen, daß sie die Bestandteile eines solchen Gasmoleküls durch den Stoß trennen. Als Bestandteile aber eines Gasmoleküls wie aller Moleküle wird man erstens das negative Elektron und zweitens als Rest das positive Ion anzusehen haben. Durch den I o n e n s t o ß werden also bisher neutrale Gasmoleküle in ihre Ionen zertrümmert

werden können. Man sagt, das Gas werde dadurch *ionisiert*. Wir werden weiter noch andere Mittel finden, durch welche Gase ionisiert werden können; für unseren Zweck aber ist jetzt die Ionisierung durch Ionenstoß von Bedeutung. Andererseits aber wird es auch vorkommen können, daß z. B. ein negatives Elektron an ein neutrales Gasmolekül stößt, dieses zwar zertrümmert, sich selbst aber mit dem positiven Ion vereinigt (also absorbiert wird), während das neu frei gewordene negative Ion fortfliegt und nun weiter ionisieren kann.

Solche Ionisierungen durch Ionenstoß kommen nun nach den jetzigen Auffassungen in verdünnten Gasen immerfort vor und die *leuchtenden* Teile des Gases sind es gerade, in welchen Ionisation stattfindet. Wenn in einer Geißlerröhre, bei der die Entladung im allgemeinen die Form der Fig. 310 hat, aus der Kathode negative Elektronen in das Gas treten, so werden sie von der Kathode abgestoßen, erreichen also in einiger Entfernung eine gewisse Geschwindigkeit, welche sie befähigt, durch Stoß zu ionisieren. Die Schicht, in der sie das tun, ist die *zweite* Kathodenschicht II (oben S. 301). Dort, nach Durchfliegung des Hittorfschen Dunkelraumes D, zertrümmern sie die Gasmoleküle. Die erzeugten positiven Ionen fliegen nun sofort auf die Kathode zu und bilden dort die *erste*

Fig. 310.



Kathodenschicht I, die, wie wir wissen, in Luft goldgelb gefärbt ist. Diese wird also von positiven Ionen gebildet. Ist die Kathode durchlöchert, so fliegen die positiven Ionen durch sie hindurch und bilden, wenn sie rasch genug fliegen, die Kanalstrahlen. Die erste Kathodenschicht in den Geißlerröhren entspricht also den Kanalstrahlen bei stärkerer Evakuation. Die negativen Ionen nun, welche in der zweiten Kathodenschicht frei geworden sind, fliegen weiter zur Anode hin und nachdem sie eine gewisse Strecke durchlaufen haben, nämlich den Faradayschen dunklen Raum, haben sie genügend Geschwindigkeit erlangt, um wieder zu ionisieren. Die Stelle, wo sie das zuerst tun, ist das Ende des *positiven Lichts*, dasjenige Ende, welches am weitesten von der Anode entfernt ist. Bei geeigneten Verdünnungen können die negativen Elektronen so große Geschwindigkeiten haben, daß sie nicht bloß am Ende, sondern auf der ganzen folgenden Strecke fortwährend Ionisierung hervorbringen. Dann hat man es mit einer kontinuierlichen positiven Lichtsäule zu tun. Oder aber bei anderen Verdünnungen erregen sie zunächst bloß das Ende des positiven Lichts, indem sie von den dort befindlichen Gasteilchen die negativen Elektronen zum Abschleudern bringen. Diese aber haben zunächst noch nicht die Geschwindigkeit, welche sie in den Stand setzt, weiter zu ionisieren, sondern sie müssen erst unter dem Einfluß der elektrischen Kräfte in der Röhre eine Strecke weiter fliegen, auf der sie all-

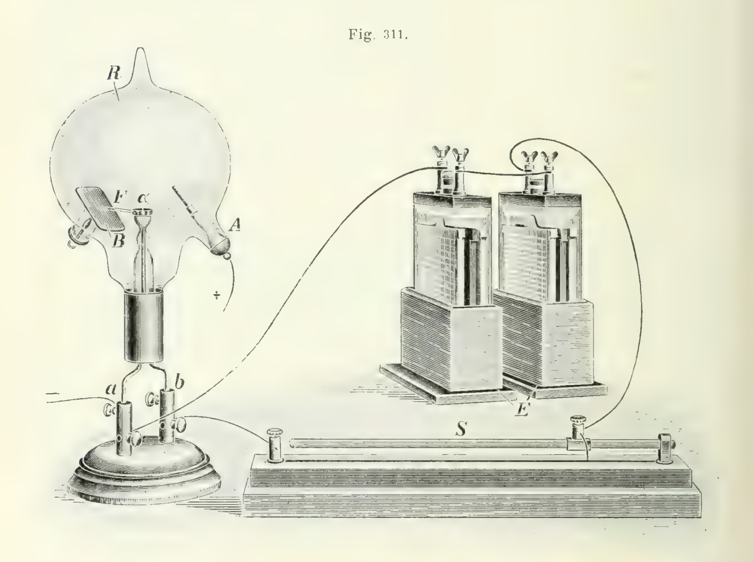
mählich beschleunigt werden, um dann erst die genügende Geschwindigkeit zu erlangen, daß sie wieder ionisieren, also auch das Gas zum Leuchten bringen können. Nach dem leuchtenden Ende des positiven Lichts wird dann also erst ein dunkler Zwischenraum und dann wieder leuchtendes Gas folgen, und derselbe Vorgang wird sich weiter wiederholen, so daß auf diese Weise die zuerst so merkwürdigen und rätselhaften Schichtungen des positiven Lichts sich erklären.

Man sieht, wie die Elektronentheorie vollkommene Rechenschaft von dem Verhalten der verdünnten Gase gegenüber dem elektrischen Strom gibt. Daß man, um Kathodenstrahlen zu erzeugen, eine recht hohe Spannung der Elektrizitätsquelle anwenden muß, hat, wie experimentelle Messungen ergeben haben, seinen Grund darin, daß in unmittelbarer Nähe der Kathode selbst der Strom scheinbar großen Widerstand findet. Der Spannungsverlust, den der Strom beim Durchgang durch die Röhre findet, ist am größten in unmittelbarer Nähe der Kathode. Man bezeichnet den Spannungsverlust zwischen der Kathode und der zweiten (negativen) Glimmschicht als den Kathodenfall. Dieser macht den größten Teil des gesamten Spannungsverlustes aus, der überhaupt in der Röhre stattfindet. Der Kathodenfall kommt daher, daß die negativen Elektronen, um überhaupt aus dem Metall in das Gas auszutreten, schon eine erhebliche elektrische Kraft brauchen. Sind sie einmal ausgetreten, so fliegen sie rasch von der Kathode fort. Es tritt also eine Verarmung des Gases an negativen Elektronen in der Nähe der Kathode ein, die so lange anwächst, bis die durch die Abnahme der Elektronen hervorgerufene große Spannungsdifferenz zwischen Kathode und zweiter Kathodenschicht den weiteren Elektronen den Austritt aus der Kathode gestattet. Wie groß diese Spannungsdifferenz, dieser Spannungsverlust sein muß, das hängt von der Natur des Kathodenmetalles und von der Art des Gases ab, das sich in der Röhre befindet. Manche Metalle lassen unter gleichen Umständen sehr schwer, andere weniger schwer die negativen Elektronen aus sich heraus. Am leichtesten strömen die Elektronen, wie Wehnelt gefunden hat, aus glühenden Metalloxyden aus. Wehnelt hat auf Grund dieser Beobachtungen Röhren konstruiert, bei denen man schon mit 100 Volt Spannungsdifferenz Kathodenstrahlen erzeugen kann, während bei gewöhnlichen Elektroden mehrere tausend Volt dazu nötig sind. Eine solche Röhre mit Wehneltscher Kathode und die Art ihrer Anwendung zeigt Fig. 311. Eine evakuierte Röhre R enthält, in der Mitte eingeschmolzen, ein dünnes Platinblech, auf welchem eine Stelle α mit Calziumoxyd bedeckt ist. Durch die Klemmen a und b wird in das Platinblech von 2 Akkumulatoren E ein Strom gesendet, der noch durch einen Schieberrheostaten S, einen Draht von zu variierender Länge geht, um ihm diejenige Stärke zu geben, daß er das Platinblech auf helle Rotglut bringt. Bei A ist die Anode der Röhre, das Platinblech selbst wird Kathode. Verbindet man A und etwa a mit einer Stromquelle von 100 Volt Spannung, so sieht man von α einen schmalen blauen Strahl F, einen Kathodenstrahl ausgehen. Dieser Kathodenstrahl fällt auf das Blech B, wird aber, wenn dieses negativ elektrisch gemacht wird (etwa durch Verbindung mit a), von ihm abgestoßen und krümmt sich sehr lebhaft. Ebenso wird er auch von einem Magneten sehr stark gekrümmt, weil

eben die Elektronen, wegen der geringen Spannung in der Röhre, auch verhältnismäßig sehr geringe Geschwindigkeit besitzen, also leicht aus ihrer Bahn abgelenkt werden können.

Das Interesse für die Kathodenstrahlen, das durch die oben erwähnten resultatreichen und mühsamen Untersuchungen von Hertz und Lenard bei den Physikern erweckt war, wurde im Anfang des Jahres 1896 allgemein durch eine zufällige Entdeckung, die sofort merkwürdige praktische Anwendungen zeitigte. Es zeigte sich, daß von einer Röhre, in der Kathodenstrahlen vorhanden sind, auch Strahlen geliefert werden, die aus dem Glase heraustreten und weit in die freie Luft gehen können. Von derjenigen Stelle des Glases einer Crookesschen Röhre, welche von den

Fig. 311.



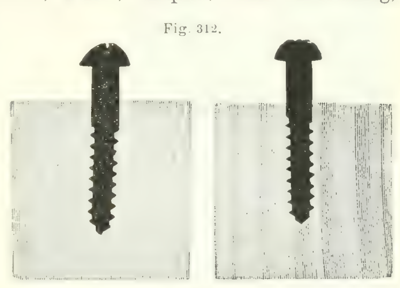
Kathodenstrahlen getroffen und zur Phosphoreszenz erregt wird, gehen nämlich, wie Röntgen fand, Strahlen aus, welche er X-Strahlen nannte, welche man aber jetzt gewöhnlich Röntgenstrahlen nennt. Diese Strahlen geben sich dadurch zu erkennen, daß sie auf photographische Platten, die außerhalb der Röhre sich befinden, wirken, und ferner auch dadurch, daß sie fluoreszenzfähige Körper zum Leuchten (Fluoreszieren) erregen. Umhüllt man also eine Crookessche Röhre, um alle Wirkungen des sichtbaren Lichtes auszuschließen, mit einem schwarzen Karton oder mit schwarzem Tuch und bringt man in die Nähe der von den Kathodenstrahlen getroffenen Stelle des Glases einen Papierkarton, der mit Baryumplatincyanür bestrichen ist, so findet man, daß dieser hell grünlich aufleuchtet. Bringt man ebenso in die Nähe eine photographische Platte,

so wird diese belichtet. Denn wenn man sie in gewöhnlicher Weise entwickelt, so zeigt sie sich vollkommen geschwärzt.

Diese unsichtbaren Strahlen gehen genau von derjenigen Stelle der Crookesschen Röhre aus, welche von den Kathodenstrahlen getroffen ist. Man kann das leicht nachweisen, indem man durch einen Magneten die Kathodenstrahlen im Inneren der Röhre ablenkt und sie auf eine andere Stelle der Glaswand hinlenkt. Dann ist die neue getroffene Stelle die wirksame.

Das Merkwürdigste ist, daß diese Strahlen durch die meisten nicht metallischen Körper leicht hindurchgehen, durch die gewöhnliches Licht nicht hindurchdringt. Insbesondere ist das Holz für diese Strahlen sehr leicht durchlässig. Sie gehen durch Holz ebenso leicht hindurch wie die gewöhnlichen Lichtstrahlen durch Glas. Daraus folgt, daß, wenn man eine photographische Platte durch sie belichten lassen will, man diese Platte ruhig in eine Holzkassette eingeschlossen ihnen exponieren darf. Ebenso wie das Holz sind aber auch andere undurchsichtige Körper, Ebonit, Kautschuk, Wachs, Kork, Kohle, Graphit, leicht durchlässig, ja auch Aluminium läßt diese Strahlen ganz ebenso leicht durchgehen wie Glas. Die schweren Metalle sind viel undurchlässiger, aber auch nicht vollständig. Auch durch Eisen, Silber, Gold, Kupfer in dünnen Schichten gehen die Strahlen. Blei ist am allerwenigsten durchlässig. Überhaupt läßt sich ungefähr sagen, daß ein Körper um so leichter den Röntgenstrahlen den Durchgang gestattet, je geringer sein spezifisches Gewicht ist, um so schwerer also, je dichter er ist. Auf die optische Durchlässigkeit kommt es gar nicht an. Aluminium und Glas, die ziemlich gleich dicht sind, haben die gleiche Durchlässigkeit; Holz, namentlich Tannenholz, das viel leichter ist, ist auch viel durchlässiger. Unterschiede in der Dichtigkeit zwischen verschiedenen Körpern geben auch Unterschiede in der Durchlässigkeit. Darauf beruht nun der Versuch, der diesen Strahlen so rasch ihre Popularität verschafft hat. Es gelingt dadurch, aus umhüllten oder verschlossenen Körpern den Inhalt zu photographieren, wenn der Inhalt dichter ist als die Umhüllung. So kann man aus einem verschlossenen Portemonnaie das Geld, aus einem Holzblock etwa darin enthaltene Schrauben, aus der Hand die Knochen photographieren, weil eben die Geldstücke die auftreffenden Strahlen mehr zurückhalten als das Leder, die Schraube mehr als das Holz, die Knochen mehr als das Fleisch.

Fig. 312.



So zeigt Fig. 312 die Photographie von zwei Metallschrauben, die in zwei verschiedene Holzklötze eingedreht waren. Man sieht mit großer Schärfe die Schrauben, man sieht aber auch die Fasern und die Maserung des Holzes, welche vermöge ihrer verschiedenen Dichtigkeit auch verschiedene Durchlässigkeit haben.

In Fig. 313 sieht man das vollständige Knochengerüst einer Hand und

sieht zugleich am Ringfinger einen Ring, der natürlich am meisten undurchsichtig ist.

Die frappanteste Eigenschaft der Röntgenstrahlen ist eben diese, daß sie so leicht durch alle möglichen undurchsichtigen Stoffe hindurch sich fortpflanzen. Sie zeigen aber noch weitere Unterschiede von den Lichtstrahlen. Während diese vom Spiegel bekanntlich regelmäßig reflektiert werden, lassen sich die Röntgenstrahlen nicht regelmäßig reflektieren, sondern nur in geringem Maße zerstreut zurückwerfen. Ebenso zeigen sie entgegen den gewöhnlichen Lichtstrahlen auch keine Brechung, wenn sie durch ein Prisma hindurchgesendet werden. Von den Kathodenstrahlen unterscheiden sie sich dadurch, daß sie von einem Magneten nicht abgelenkt werden. Allerdings gibt es auch Kathodenstrahlen, welche keine magnetische Ablenkung erfahren.

Fig. 313.

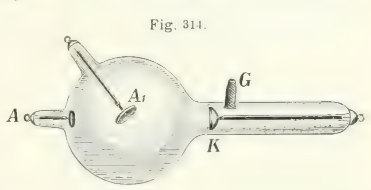


Man hat sich natürlich gleich nach der Entdeckung dieser Strahlen wegen ihrer so hervorragenden medizinischen Wichtigkeit bemüht, Konstruktionen für die Röhren und die Elektroden zu finden, welche für die photographische Wirkung am zweckmäßigsten sind. Dabei hat sich nun zunächst gezeigt, daß es durchaus nicht am besten ist, wie es zuerst geschah, die Röhrenwand selbst zum Phosphoreszieren zu bringen und von ihr aus die Strahlen ausgehen zu lassen. Vielmehr hat sich ergeben: Jeder Körper, der von Kathodenstrahlen getroffen wird, ob er innerhalb der Röhre oder an der Röhrenwand sich befindet, wird zum Ursprung von Röntgenstrahlen. Der Körper kann sichtbar phosphoreszieren, wie es das Glas der Röhrenwand oder eingeschmolzene Mineralien tun, es kann aber auch ein Metall sein, welches nicht leuchtend phosphoresziert. Auch Metalle senden die Strahlen aus, wenn sie von den Kathodenstrahlen getroffen werden und zwar sogar zum Teil besonders stark. Allgemein bezeichnet man jetzt diejenige Stelle, welche von den Kathodenstrahlen getroffen wird und daher Röntgenstrahlen aussendet, als die Antikathode der Röhre.

Um möglichst scharfe photographische oder fluoreszierende Bilder zu erhalten, muß man danach trachten, die Röntgenstrahlen möglichst von einem Punkt ausgehen zu lassen, nicht von einer ganzen Fläche. Denn wenn Strahlen von allen Punkten einer ausgedehnten Fläche ausgehen, so erhält man Bilder, welche verschwommene Grenzen und Schlagschatten besitzen. Die obige Forderung kann man nun einfach dadurch erfüllen, daß man die Kathode der Röhre hohlspiegelartig macht. Wir wissen ja (S. 303), daß die Kathodenstrahlen dann in einem Punkt, dem Brennpunkt des Hohlspiegels, zusammentreffen. Bringt man nun ungefähr an die Stelle dieses Brennpunktes ein Metallblech in das Innere der Röhre, so wird

dieses die Antikathode und von ihm gehen dann die Strahlen aus. In dieser Weise werden jetzt durchweg die Röhren für diese Versuche konstruiert. Man bezeichnet sie als F o k u s r ö h r e n. Dieselben besitzen drei Metallbleche im Inneren. Ein hohlspiegelartig geformtes als Kathode, ein anderes ebenes als Anode und ein drittes Metallblech, welches als Antikathode dient und in den Brennpunkt der Kathodenstrahlen gestellt ist. So zeigt Fig. 314 eine Röhre, wie sie für kleine Induktorien vielfach gebraucht wird. Man sieht rechts die hohlspiegelförmige Kathode K, links die Anode A und in der Mitte die Antikathode A_1, eine Aluminiumplatte, auf welcher ein Platinblech befestigt ist. Bei G war die Glasröhre mit der Pumpe verbunden. Das Ansatzrohr ist dort abgeschmolzen, mit einem Stück Kautschukschlauch umgeben und kann in vorsichtiger Weise zum Befestigen der Röhre in einer Klemme dienen. Die Antikathode kann mit der Anode außen durch einen Draht verbunden werden. Dann ist die Antikathode zugleich Anode und die Röntgenstrahlen gehen von der Anode aus. Die Platinantikathode sendet von der bestrahlten Seite aus die Röntgenstrahlen durch den vor ihr liegenden Teil der Glaskugel, welche dabei schön grün phosphoresziert. Man gibt im allgemeinen der Kugel, in welcher die Antikathode sich befindet, ein recht großes Volumen, weil dann die Röhren haltbarer sind.

Fig. 314.



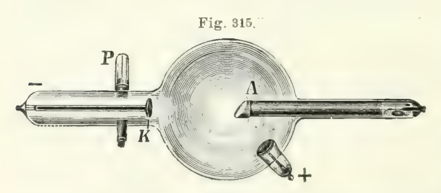
Die Verdünnung der Luft in den Röhren ist allmählich immer weiter getrieben worden. Genau läßt sich der Grad der Luftverdünnung nicht angeben, er ist vielmehr nur aus der Schlagweite einer parallel zur Röhre geschalteten Funkenstrecke zu schätzen. Während anfangs Schlagweiten von 15 bis 30 mm benutzt wurden, evakuiert man jetzt so stark, daß Schlagweiten von 50 bis 100 mm nötig sind, um die Entladung durch die Röhre gehen zu lassen. Beim praktischen (medizinischen) Gebrauch der Röntgenröhren schaltet man jetzt fast durchgängig parallel zur Röntgenröhre eine Funkenstrecke, deren beide Leiter man vertikal übereinander anordnet. Der obere geht durch eine Hülse und kann durch eine Schnur leicht gehoben und gesenkt werden.

Je nach dem Vakuum, welches eine Röhre besitzt, sind die Röntgenstrahlen, welche sie aussendet, von verschiedener Art. Eine Röhre mit verhältnismäßig geringem Vakuum sendet Strahlen aus, welche von dichten Körpern leicht absorbiert werden. Eine solche Röhre bezeichnet man als w e i c h e R ö h r e. Geringe Unterschiede in der Dichtigkeit von durchstrahlten Körpern bringen bei ihnen schon merkliche Verschiedenheiten in der Durchlässigkeit für die Strahlen hervor. Daher geben solche Röhren auf der photographischen Platte k o n t r a s t r e i c h e Bilder. Aber dicke Schichten von Körpern lassen sich durch solche Röhren nicht photographieren, weil eben die Strahlen nicht durchgelassen werden. Im Gegensatz dazu nennt man Röhren, in denen das Vakuum sehr hoch ist, h a r t e R ö h r e n. Die Strahlen, die von diesen ausgehen, werden wenig absorbiert, sie dringen auch durch dicke Schichten

von Körpern hindurch, aber gerade wegen dieser geringen Absorption geben sie keine kontrastreichen Bilder. Sie werden z. B. durch die Knochen fast ebenso leicht hindurchgelassen wie durch das Fleisch und man erhält daher mit ihnen keine deutliche Knochenphotographie.

Bei allen Röntgenröhren tritt aber ein Umstand sehr störend auf. Die Röhren werden mit dem Gebrauch allmählich von selbst immer luftleerer, das Vakuum in der Röhre verändert sich beim Gebrauch selbst in dem Sinne, daß die Röhre von selbst luftleerer, also härter wird. Der Grund davon ist der, daß die geladenen Gasteilchen im Innern sich an den Glaswänden festsetzen. Daraus ergeben sich aber auch sofort einige Mittel, wie man solchen zu hart oder vielleicht ganz unbrauchbar gewordenen Röhren wieder aufhelfen kann. Man muß danach trachten, die anhaftenden Gasschichten wieder frei zu machen. Das gelingt dadurch, daß man das Glas der Röhre erwärmt, namentlich in der Nähe der Kathode. Dann funktionieren solche schon unbrauchbar gewordene Röhren wieder eine Zeitlang recht gut. Wirksamer ist das Mittel, das Ansatzrohr, welches die Kathode enthält, mit angefeuchtetem Papier oder angefeuchteter Leinwand zu umhüllen, und zwar der ganzen Länge nach, von der Einschmelzstelle der Kathode an bis an die Glaskugel. Dadurch nämlich wird die statische Elektrizität des Glases abgeleitet und die Gasteilchen sind wieder frei beweglich. Der umgekehrte Fehler, daß der Druck des Gases in einem Rohr zu groß ist, bewirkt ebenfalls, daß die Röhren schlechte Wirkung zeigen. Die Röhre ist dann zu weich. Den Fehler der zu großen Weichheit kann man gewöhnlich leicht dadurch beseitigen, daß man die Entladung eine Zeitlang in umgekehrter Richtung durch die Röhre hindurchgehen läßt, so daß die Platinantikathode zur Kathode wird. Dann zerstäubt nämlich das Platin und ein Teil des in der Röhre enthaltenen Gases wird von den Platinteilchen absorbiert, so daß die Röhre wieder härter wird. Diese Zerstäubung der Antikathode tritt übrigens bei den Röhren, auch bei richtiger Benützung, ein, wenn die Kathodenstrahlen so stark werden, daß sie die Antikathode stark erhitzen. Namentlich bei der Anwendung der neuen Unterbrecher, des Wehneltschen und des Turbinenunterbrechers, sind die Energiemengen, die in die Röhre hineingesendet werden, so große, daß die Antikathode rasch ins Glühen kommt. Man tritt dem entgegen, indem man entweder den Metallstab, welcher die Antikathode trägt, sehr dick macht, damit die Erwärmung geringer wird, oder bei sehr starker Beanspruchung der Röhre, indem man die Antikathode so einrichtet, daß man sie durch fließendes Wasser kühlen kann, sogenannte wassergekühlte Röhren.

Fig. 315.

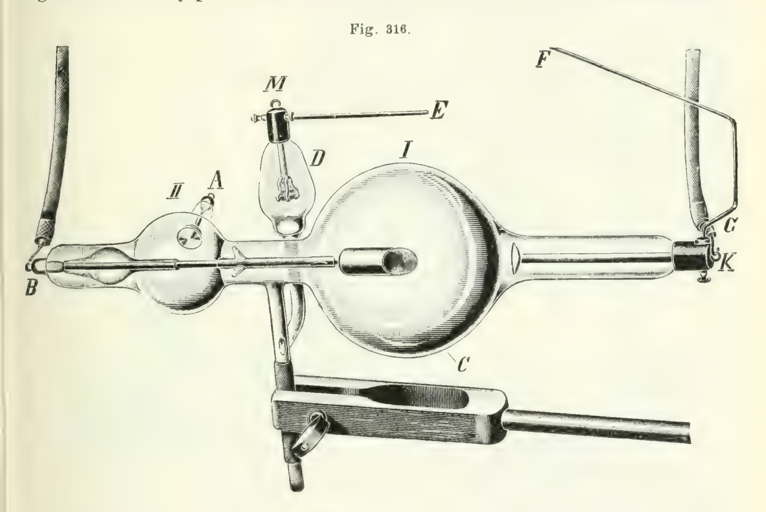


Um zu harte Röhren wieder weicher zu machen, hat man allmählich bessere Mittel, als die oben angegebenen, gefunden und es werden sogar Röhren konstruiert, welche gestatten, die Verdünnung innerhalb gewisser Grenzen zu regulieren, so daß man sie auf den jedesmal gewünsch-

ten Grad der Verdünnung einstellen kann. Man nennt die Röhren dann Röhren mit Regenerierung. Eine solche Röhre ist z. B. die in Fig. 315 dargestellte. Die Regulierung des Vakuums beruht hierbei darauf, daß Palladium bei Rotglut Wasserstoff durch sich hindurch diffundieren läßt. Es ist deshalb in die Röhre (die eine verstärkte Antikathode A besitzt, um große Energiemengen ohne schädliche Erhitzung aufzunehmen) ein Palladiumröhrchen P eingeschmolzen, welches für gewöhnlich durch eine Kappe geschützt ist. Ist die Röhre zu hart geworden, so erhitzt man das Palladiumröhrchen durch eine Spiritusflamme, wodurch Wasserstoff in das Innere der Kugel dringt und die Röhre weicher macht.

Eine andere Art der Regulierung ist z. B. bei der in Fig. 316 dargestellten Polyphosröhre benutzt, welche von der Elektrizitäts-

Fig. 316.

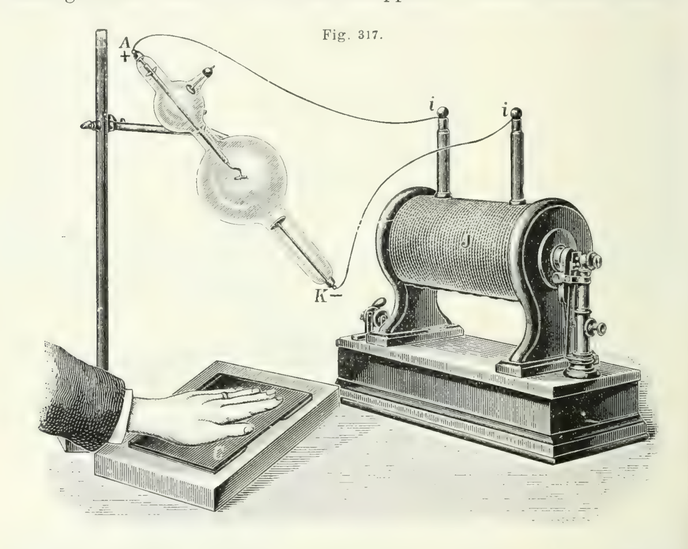


gesellschaft Polyphos in München konstruiert wird. K ist die Kathode, B die Antikathode, die hier durch einen starken Eisenzylinder verstärkt ist, um große Energiemengen vertragen zu können. Für gewöhnlich benutzt man B zugleich als Anode, man kann aber auch A zur Anode machen. Um das Vakuum der Röhre regulieren zu können, ist an die Röhre noch ein besonderes Gefäß D angeschmolzen, welches mit der Röhre selbst zusammen ausgepumpt ist. Dieses enthält nun eine kleine Hilfskathode (die an M befestigt ist) und dieser gegenübergestellt eine Hilfsantikathode, ein Metallblech, welches mit Substanzen bestrichen ist, die beim Erhitzen Luft abgeben. An K sowohl wie an M sind Metallstangen befestigt, deren Enden E und F in beliebigen Abstand gebracht werden können. Wird nun das Vakuum der Röhre zu groß, so daß die Entladung nicht mehr durch die Röhre geht, so springen Funken zwischen F und E über und die Hilfskathode in D sendet nun Kathodenstrahlen auf ihre

Hilfsantikathode, die dadurch erwärmt wird und Luft abgibt. Dadurch wird aber das Vakuum der Röhre geringer, die Röhre wird wieder weicher und man hat es in der Hand, durch kürzeren oder längeren Gebrauch der Hilfskathode die Röhre auf jeden beliebigen Grad der Weichheit zu bringen. Durch umgekehrtes Einschalten des Stromes kann man sie dann auch wieder beliebig härter machen. So kann man die Luftverdünnung in der Röhre regeln.

Die Anstellung der photographischen Versuche mit einer Röntgenröhre ist nun sehr einfach. Will man z. B. eine Knochenphotographie der Hand haben, so wird die Röntgenröhre, wie Fig. 317 zeigt, in einem Stativ so befestigt, daß von der Antikathode A die Röntgenstrahlen nach unten geworfen werden. Ein Induktionsapparat J wird mit seinen Polen i i

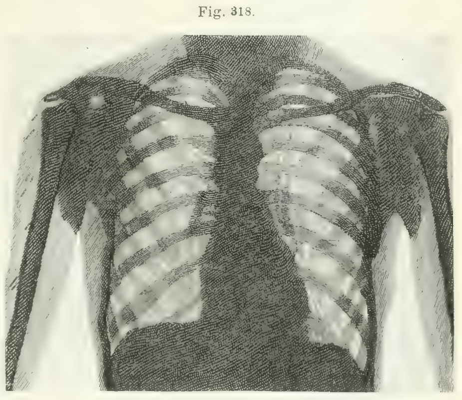
Fig. 317.



mit der Kathode K und Anode A der Röhre verbunden. Auf den Tisch, unterhalb der Röhre, wird eine photographische Platte, in schwarzes Papier C gehüllt, gelegt (sie kann auch in eine Holzkassette gelegt werden), mit der Schichtseite nach oben, und direkt auf das umhüllende Papier wird die zu photographierende Hand gelegt. Setzt man den Induktionsapparat in Tätigkeit, so wird die Platte von den Röntgenstrahlen bestrahlt und zwar an den durchlässigen Teilen der Hand, den Muskeln, stärker als an den weniger durchlässigen Knochen und dem Ring. Entwickelt man dann die Platte im gewöhnlichen roten Licht mit gewöhnlichem Entwickler (Amidol, Hydrochinon etc.), so sieht man die Knochen hell auf dunklem Grunde erscheinen. Die Dauer der Exposition richtet sich nach der Güte der Röhre und der Stärke und der besonderen Art der Stromkurve des angewandten Funkeninduktors.

Während man im Anfang 5 bis 10 Minuten für eine Knochenphotographie der Hand brauchte, kann man jetzt, mit den verbesserten Röhren und den verbesserten Unterbrechern, schon in Bruchteilen einer Sekunde eine solche erzielen. Wenn man den Turbinenunterbrecher oder den elektrolytischen anwendet, so kann man schon in einer Sekunde eine Photographie des Brustkorbes, in 10 Sekunden eine solche des Beckens hervorbringen. Ja nicht bloß die Knochen, sondern auch Weichteile, die in ihrer Durchlässigkeit Differenzen zeigen, bilden sich so auf der photographischen Platte ab. So stellt Fig. 318 die Aufnahme des Oberkörpers dar, in der man sowohl die Rippen, wie auch in der Mitte und seitlich das Herz und in den Lungen als Schattenbilder mehr oder weniger dunkle Partieen erkennt, die dem Arzt Anhaltspunkte für verschiedene Schlüsse geben.

Fig. 318.

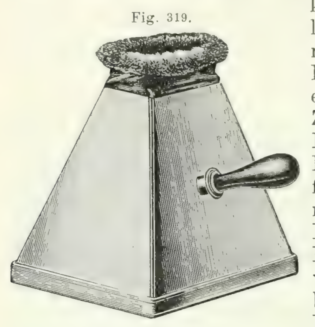




Die intensiv wirkenden Röntgenstrahlen lassen sich aber, außer zur Herstellung von Photographieen, ganz besonders zu direkter *Durchleuchtung* namentlich des Körpers verwenden. Dies geschieht durch Benutzung der Eigenschaft, daß diese Strahlen Fluoreszenz erregen. Es werden sogenannte *Fluoreszenzschirme* von den Fabrikanten hergestellt, welche zu diesem Zwecke dienen. Diese bestehen aus einem schwarzen Karton, der mit einer ziemlich dicken Schicht von feingepulvertem Baryumplatincyanür und einem Bindemittel auf der einen Seite bestrichen ist. Läßt man auf einen solchen Schirm von der Rückseite, also durch den Karton hindurch, Röntgenstrahlen fallen, so leuchtet diese Schicht im Dunkeln sehr hell weiß mit einem Stich ins Grüne. Bringt man nun zwischen die Röhre und den Schirm etwa die Hand, so werden die Strahlen vom Fleisch leicht durchgelassen, von den Knochen aber weniger, und man sieht daher auf dem Schirm ein Schattenbild der Hand mit den Knochen, nämlich die Knochen dunkel auf hellerem Grunde. Und so kann man nicht bloß die Knochen der Hand, des Unter- und Oberarms, sondern auch die des Fußes, des Unterschenkels und Oberschenkels, ferner die Rippen des Brustkastens und die Schädelknochen deutlich sehen. Aber außer den Knochen sieht man auch innere weiche Organe, die Lungen, das Herz, das Zwerchfell, den Magen, direkt auf dem fluoreszierenden Schirm. Ja man kann sogar die Bewegung des Zwerchfells beim Atmen und die Bewegung des Herzens bei seiner fortwährenden Tätigkeit direkt mit bloßem Auge dabei verfolgen.

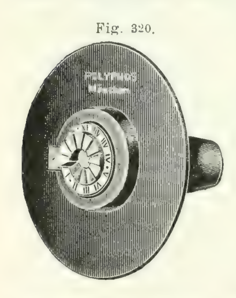
Für diese Fluoreszenzbeobachtungen muß zunächst das Zimmer, in dem beobachtet wird, vollständig dunkel sein. Denn die Helligkeit des Fluoreszenzlichtes, obwohl sie im Dunkeln sehr bedeutend erscheint, wird doch schon durch gewöhnliches Lampenlicht überstrahlt. Indes kann man natürlich auch eine Verdunkelung des Zimmers vermeiden, wenn man nur dafür sorgt, daß auf das Auge des Beobachters kein anderes Licht fällt, als eben das des fluoreszierenden Schirmes. Zu diesem Zweck benutzt man, wie Fig. 319 zeigt, einen Apparat, den man Kryptoskop genannt hat. Der fluoreszierende Schirm bildet nämlich, mit der Schichtseite nach innen, den Boden eines lichtdicht verschlossenen Kastens. In die Öffnung oben, die aus weichem, sich anschmiegendem Stoff gebildet ist, steckt der Beobachter seinen Kopf, und nun kann er, da durch den Boden gewöhnliches Licht nicht hindurchgeht, sondern nur die Röntgenstrahlen, direkt die Bilder auf dem Schirm beobachten.

Fig. 319.



Die Beobachtung der Fluoreszenz gibt auch ein bequemes Mittel, um die Härte verschiedener Röhren zu beurteilen und die Röhren nach Härtegraden zu qualifizieren. Der Härtemesser nach Benoist (Fig. 320) enthält in der Mitte ein dünnes Silberblech und rings um dieses angeordnet Aluminiumklötze in zwölf verschiedenen, abgestuften Dicken I bis XII. Wird der ganze Apparat den Röntgenstrahlen ausgesetzt und sieht man durch die Öffnung des Trichters, so erkennt man auf einem darin befindlichen Fluoreszenzschirm Schattenbilder verschiedener Dichte. Man vergleicht, welcher Aluminiumklotz dieselbe Schattendichte gibt, wie das Silberblech. Bei härteren Röhren werden die dickeren Klötze ebenso leicht durchstrahlt, wie das dünne Silber, bei weicheren nur die dünneren. Die Nummer des betreffenden Aluminiumklotzes bezeichnet man daher als Härtegrad der Röhre.

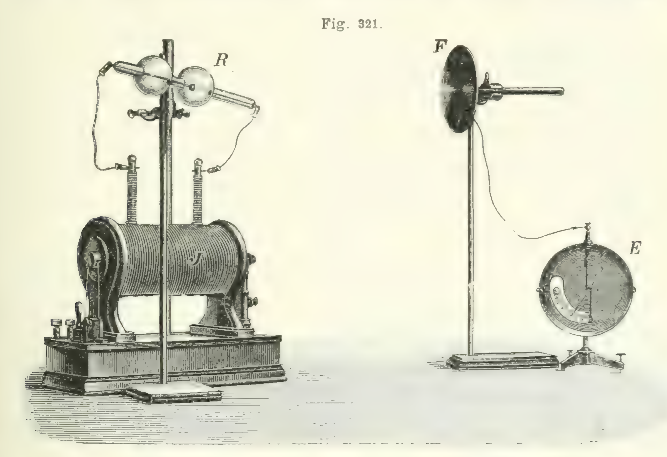
Fig. 320.



Die Erfolge, die mit Röntgenstrahlen in der Medizin täglich erzielt werden, namentlich zur Auffindung von Fremdkörpern, Nadeln, Metallsplittern im Körper, aber auch zur Untersuchung der inneren Organe, der Größe des Herzens u. s. w., sind ja bekannt genug. Aber nicht bloß für die Diagnose, sondern auch für die Bekämpfung und Heilung von Krankheiten haben sich die Röntgenstrahlen wertvoll erwiesen. Allerdings sind diese Strahlen in manchen Fällen für den menschlichen Körper nicht ungefährlich, ja bei gewissen Personen haben sie sehr schwere Krankheiten hervorgebracht, so daß jedenfalls die Röntgenstrahlen am menschlichen Körper nur mit Vorsicht gebraucht werden dürfen.

Eine Eigenschaft der Röntgenstrahlen wurde im obigen noch gar nicht berührt, und gerade diese ist physikalisch von hohem Interesse. Diese Eigenschaft besteht darin, daß die Röntgenstrahlen elektrisch geladene Körper, auf die sie fallen, sehr rasch entladen. Um dieses zu zeigen, bringt man etwa, wie in Fig. 321, eine Metallplatte F, die an einem wohlisolierenden Glasstab befestigt ist, in ein Stativ und verbindet sie durch einen Draht mit einem Elektroskop, etwa dem auf S. 18 beschriebenen. Wenn man nun mit einer geriebenen Ebonitstange die Metallplatte negativ elektrisiert, so schlägt die Nadel des Elektroskops aus und bleibt abgelenkt, weil ja die umgebende Luft ein Isolator ist. So wie man aber in der gegenübergestellten Röhre R die Röntgenstrahlen erzeugt, geht der Zeiger des Elektroskops fast momentan zurück, ein Beweis, daß

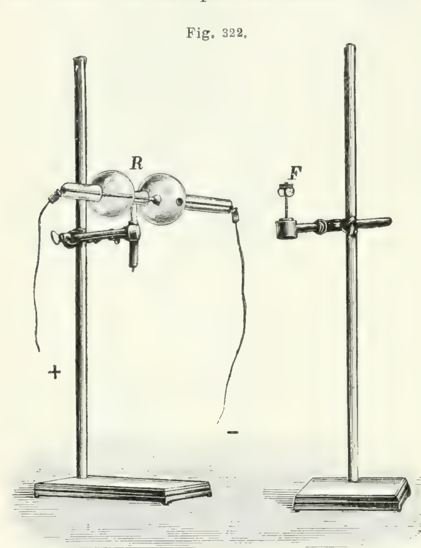
Fig. 321.



die geladene Platte dadurch entladen wurde. Macht man denselben Versuch, nur mit dem Unterschiede, daß man die Platte nicht negativ, sondern durch einen geriebenen Glasstab positiv lädt, so findet dasselbe statt. Auch die positive Ladung verschwindet durch das Auftreffen der Röntgenstrahlen. Am einfachsten läßt sich dieser Versuch so deuten — und diese Deutung wird durch besondere zu ihrer Prüfung angestellte Versuche bestätigt —, daß die Luft, die von den Röntgenstrahlen durchzogen ist, ihr Isolationsvermögen verloren hat und selbst leitend geworden ist. Wenn die Luft leitend geworden ist, so kann natürlich eine Ladung auf einem Körper nicht bestehen bleiben, sondern sie muß abgeleitet werden auf die Umgebung und schließlich auf die Erde, so daß dadurch der geladene Körper zur Erde abgeleitet ist. Natürlich wird die durchstrahlte Luft nicht etwa ein so guter Leiter wie Kupfer oder auch nur wie eine Salzlösung, die Leitungsfähigkeit ist noch außerordentlich gering, aber sie genügt doch, um die geladenen Körper, die Spannungen von einigen hundert oder tausend Volt gegen die Erde haben, sehr rasch zu entladen.

Diese elektrische Wirkung kann unter anderem dazu dienen, auch durch die Röntgenstrahlen solche mechanische Bewegungen hervorzubringen, wie sie oben bei den Kathodenstrahlen beschrieben wurden. Man muß dazu leichte isolierende Körper nehmen, z. B. zwei Scheiben aus Paraffin, die durch ein Querstück verbunden sind und mittels eines Achathütchens auf einer Nähnadelspitze aufsitzen. Stellt man, wie in Fig. 322, einen solchen leicht beweglichen Körper F in der Nähe einer Röntgenröhre R auf, so kommt er in lebhafte Rotation, sobald man die Röntgenstrahlen erzeugt. Es ist nämlich die Glasfläche der Röntgenröhre stets negativ geladen (o. S. 306) und da die Luft in der Nähe der Röhre leitend wird, so geht negative Elektrizität auf die Flügel des beweglichen Körpers über. Diese werden also auf der Seite, die der Röntgenröhre zunächst liegt, negativ geladen und daher von der negativen Röhre abgestoßen. Kommen die geladenen Teile durch die entstehende Rotation auf die entgegengesetzte Seite, so wird ihre Ladung durch die Leitung der Luft weggeführt und sie werden unelektrisch und kommen in diesem Zustand wieder der Röntgenröhre gegenüber, werden wieder elektrisch und abgestoßen und daher geht die Rotation fortwährend weiter. Auch innerhalb der Crookesschen Röhren beruhen die Rotationen von Körpern vermutlich auf demselben Mechanismus.

Fig. 322.



Was die eigentliche Natur der Röntgenstrahlen betrifft, so kann man zunächst zwei verschiedene Möglichkeiten ins Auge fassen. Die erste wäre die, daß auch die Röntgenstrahlen wie die Kathodenstrahlen aus rasch fliegenden Teilchen, speziell aus rasch fliegenden Elektronen bestehen, die zweite die, daß die Röntgenstrahlen ähnlich wie die Lichtstrahlen Vorgänge im Äther seien, daß sie wie diese Wellenbewegungen des Äthers bilden. Man unterscheidet diese beiden Arten von Strahlung kurz durch die Bezeichnungen Elektronenstrahlung und Ätherstrahlung. Gegen die erstere Annahme spricht wesentlich der Umstand, daß die Röntgenstrahlen nicht durch den Magneten beeinflußt werden. Aber dieser Umstand wäre nicht durchaus maßgebend, da es auch Kathodenstrahlen gibt, und zwar solche, in denen die Elektronen sehr rasch fliegen, welche durch unsere magnetischen Kräfte nicht abgelenkt werden können.

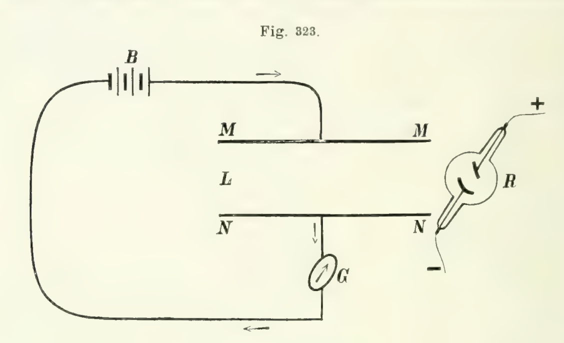
In der Tat wird von manchen Seiten die Ansicht vertreten, daß die Röntgenstrahlen auch auf der Bewegung von Massenteilchen irgend einer Art beruhen, daß sie, wie man sagt, korpuskulare Struktur haben. Die zweite Annahme, daß sie Vorgänge im Äther seien, also von derselben Art seien, wie die Lichtstrahlen, hat auch erhebliche innere Schwierigkeiten. Denn während Lichtstrahlen regelmäßig reflektiert und gebrochen werden können, zeigen die Röntgenstrahlen diese Eigenschaft nicht. Die Vorstellung, die den meisten der Tatsachen gerecht wird und die daher auch die meisten Anhänger hat, rührt von Stokes her. Man nimmt nämlich an, daß in der Röhre durch den Anprall der Elektronen an die Antikathode der Äther fortwährenden Stößen ausgesetzt ist und daß diese Stöße sich durch den Äther fortpflanzen, so daß also äußerst rasch nacheinander solche Ätherstöße z. B. auf eine photographische Platte treffen und dadurch die Moleküle der wirksamen Schicht erschüttern, so daß die Silberteilchen in dem Molekül gelockert und dann bei der Entwicklung der Platte ausgeschieden werden. Oder wenn diese rasch aufeinander folgenden Stöße auf einen Fluoreszenzschirm fallen, so erregen sie die Teilchen des fluoreszierenden Körpers so, daß diese in der ihnen eigentümlichen Periode zu schwingen beginnen, also Fluoreszenzlicht aussenden. Allerdings liegt eine direkte Bestätigung dieser Annahme bisher noch nicht sicher vor. So wichtig auch die praktische Bedeutung dieser Strahlen ist, es bleibt doch ihre wissenschaftliche Erklärung noch eine Aufgabe für weitere Forschungen.

Durch die Bestrahlung mit Röntgenstrahlen haben wir ein erstes und kräftiges Mittel gewonnen, um die Luft und andere Gase leitend zu machen. Man erklärt sich diese Tatsache so, daß einige von den Gasteilchen durch die Strahlen auseinandergerissen, zertrümmert werden, so daß dadurch freie positiv und negativ geladene Teilchen entstehen. Die Luft wird daher, wie man es nennt, durch diese Strahlen ionisiert. Man stellt sich den Vorgang so vor, daß ein Gasmolekül getrennt wird, so daß das negative Elektron von ihm frei wird und der Rest daher als positives Ion zurückbleibt. In dem ionisierten Gas befinden sich dann also erstens neutrale Moleküle, zweitens negative Elektronen, drittens positive Ionen. Es können aber auch kompliziertere Verbindungen auftreten, indem etwa die negativen Elektronen nicht frei, sondern mit den Atomen des Gases verbunden sind, wie bei der Elektrolyse, oder indem eine Reihe von Gasatomen zusammen positiv erscheinen, weil sie ein negatives Ion verloren haben. Die positiv und negativ geladenen Teilchen des Gases, deren Beschaffenheit also sehr verschieden sein kann, nennt man Gasionen. Wenn die Bestrahlung der Luft, durch welche die Gasionen entstehen, aufhört, so tritt von selbst eine Wiedervereinigung der Gasionen zu neutralen Molekülen ein, ein Vorgang, den man Rekombination nennt.

Die Luft, welche durch Röntgenstrahlen oder durch andere Mittel ionisiert ist, besitzt eine gewisse Leitungsfähigkeit, es muß also durch sie ein elektrischer Strom fließen, wie etwa durch eine Salzlösung, wenn man irgendwie zwei Stellen der Luft auf verschiedene Spannung bringt. Der Strom aber durch solche ionisierte Luft (oder durch ein anderes ionisiertes Gas) hat gewisse Eigentümlichkeiten, die man bei leitenden Metallen und Flüssigkeiten nicht findet. Wir wollen eine An-

ordnung herstellen, wie sie durch Fig. 323 gegeben ist. Zwischen zwei Platten M M und N N befinde sich Luft, die durch eine Röntgenröhre R bestrahlt und ionisiert werde. Um eine Spannungsdifferenz hervorzubringen, verbinden wir M M mit dem einen Pol, N N mit dem anderen Pol einer Batterie B (von einigen hundert oder tausend Volt). Dann fließt in dem ganzen System ein schwacher Strom, den wir durch ein sehr empfindliches Galvanometer G messen. Wenn wir die Spannung der Batterie allmählich vergrößern, sie von 200 Volt auf 400, 600 Volt bringen, so würde, wenn zwischen den Platten ein Elektrolyt sich befindet, auch die Stromstärke sich in gleichem Maße vergrößern, vom 1fachen zum 2- und 3fachen. Hier dagegen, bei den ionisierten Gasen, ist das nicht der Fall. Vielmehr nimmt bei Vergrößerung der Spannung die Stromstärke zuerst wohl proportional zu, dann aber nimmt sie in immer geringerem Maße zu und end-

Fig. 323.

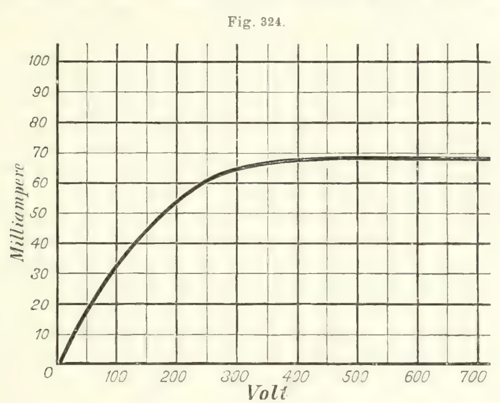


lich bleibt die Stromstärke fast unverändert dieselbe, auch wenn die Spannung immer weiter wächst. Dieser Zusammenhang zwischen Stromstärke und Spannung ist durch Fig. 324 gezeichnet, in der auf der horizontalen Linie die Spannungen zwischen den beiden Platten, auf der vertikalen die durch das Galvanometer gemessenen Stromstärken verzeichnet sind. Man sieht, daß eine gewisse maximale Stromstärke vorhanden ist, die durch das in bestimmter Weise ionisierte Gas fließt. Ob man 400, 500, 600 oder 700 Volt wirken läßt, der Strom hat immer dieselbe Stärke (in der Figur 68 Milliampere). Man bezeichnet diesen maximalen Strom als den Sättigungsstrom. Seine Größe hängt wesentlich davon ab, wie stark das Gas durch die Röntgenstrahlen ionisiert ist.

Daß ein solcher Zusammenhang zwischen Stromstärke und Spannung existiert und speziell, daß es in einem ionisierten Gas einen Sättigungsstrom geben muß, läßt sich durch sehr einfache Betrachtungen einsehen. Wenn die Röntgenstrahlen eine bestimmte Stärke haben, so zerlegen sie pro Sekunde eine gewisse Anzahl von Gasmolekülen in ihre positiven und negativen Ionen. Durch den Spannungsunterschied werden die negativen Ionen zur positiven Platte, die positiven Ionen zur negativen Platte getrieben und geben dort ihre Ladungen ab, wodurch eben der Strom ent-

steht. Je größer die Spannungsdifferenz der Platten ist, um so rascher werden die Ionen wandern, um so mehr von ihnen geben also in der Zeiteinheit ihre Ladungen ab. Zunächst muß daher die Stromstärke wachsen, wenn die Spannung wächst. Aber wenn die Spannung so groß geworden ist, daß pro Sekunde ebensoviel Ionen ihre Ladung abgeben, als pro Sekunde durch die Röntgenstrahlen erzeugt werden, dann ist offenbar das Maximum der Stromstärke erreicht. Stärker kann der Strom nicht werden, weil eben nicht genügend Ionen für einen stärkeren Strom vorhanden sind. Man sieht, daß der Sättigungsstrom zugleich ein Maß für die Stärke der Ionisierung ist, die durch die Röntgenröhre hervorgebracht ist. Dieselbe Betrachtung gilt natürlich, wenn das Gas nicht durch Röntgenstrahlen, sondern durch andere Mittel ionisiert ist, ins-

Fig. 324.



besondere durch die radioaktiven Substanzen, von denen wir im folgenden Kapitel sprechen werden.

Der Sättigungsstrom ist um so stärker, je mehr Ionen pro Sekunde in dem Gas erzeugt werden. Daraus folgt, daß er um so größer ist, je größer das bestrahlte Gasvolumen ist, also bei gleicher Ausdehnung der Platten, je dicker die bestrahlte Gasschicht ist. Denn in einem größeren Raum werden eben von den Röntgenstrahlen mehr Moleküle ionisiert. Wir haben also das merkwürdige Resultat, daß wir bei einem bestrahlten Gas einen um so stärkeren Sättigungsstrom bekommen, je weiter die Elektroden voneinander stehen, während bei einem gewöhnlichen Leitungsstrom die größere Entfernung der Elektroden umgekehrt wegen des größeren Widerstandes Abnahme der Stromstärke hervorbringt.

Die beiden Ionenarten in einem Gase bewegen sich bei Anlegung einer Spannungsdifferenz nach den entgegengesetzten Richtungen, die negativen zur positiven, die positiven zur negativen Elektrode. Die Geschwindigkeit, mit welcher die Ionen sich bewegen, wird, wie man von vornherein vermuten kann, nicht für beide Arten dieselbe sein. Denn wenn z. B. die negativen Ionen die Elektronen selbst wären, so würden diese wegen ihrer

viel geringeren Masse viel größere Geschwindigkeiten erlangen, als die positiven. Man kann aber die Geschwindigkeit der beiden Ionenarten auch direkt experimentell bestimmen. Sie ist natürlich um so größer, je größer die angewendete Spannungsdifferenz ist und auf eine je kleinere Strecke diese wirkt. Man bestimmt deswegen die Geschwindigkeit der Gasionen bei einem solchen elektrischen Feld, bei welchem der Spannungsunterschied pro Zentimeter gleich 1 Volt ist, und nennt dieses Feld das Voltzentimeterfeld und die Geschwindigkeit, welche die Ionen in diesem Feld besitzen, nennt man die Beweglichkeit der Ionen. Man kann sie für die negativen Ionen dadurch messen, daß man eine dünne Schicht Gas an der einen, etwa der unteren Platte eines Kondensators bestrahlt, dann diese Platte auf ein hohes negatives Potential ladet und die Zeit bestimmt, wann die dadurch in die Höhe getriebenen negativen Ionen die obere Platte erreichen. Dann kennt man den Weg, den die Ionen zurückgelegt haben, der gleich dem Abstand der Platten ist, und die Zeit, die sie zur Zurücklegung dieses Weges gebraucht haben, also auch ihre Geschwindigkeit. Wenn man umgekehrt die untere Platte positiv ladet, so werden die positiven Ionen abgestoßen und man kann dadurch die Beweglichkeit der positiven Ionen messen. Es ergab sich allgemein, daß die Beweglichkeit der negativen Ionen größer ist, als die der positiven. Folgende Zahlen geben die Beweglichkeit der Ionen in Zentimetern pro Sekunde an und zwar für Gase unter dem Druck einer Atmosphäre:

	Beweglichkeit (Geschwindigkeit im Voltzentimeterfeld)			
	in Luft	Sauerstoff	Kohlensäure	Wasserstoff
positive Ionen	1,36	1,36	0,76	6,70
negative Ionen	1,87	1,80	0,81	7,95

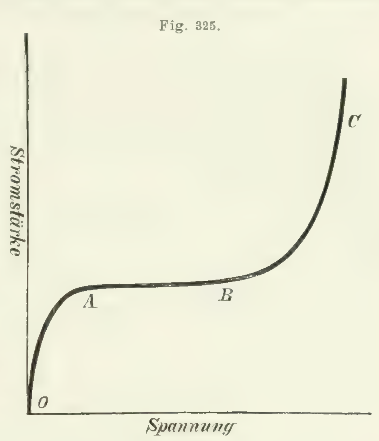
Man sieht aus diesen Zahlen, daß die negativen Ionen sich zwar immer rascher bewegen als die positiven, aber daß doch der Unterschied nicht so groß ist, wie er wäre, wenn die negativen Ionen die Elektronen selbst wären. Dagegen wird die Geschwindigkeit des negativen Ions erheblich größer, wenn man verdünnte Gase untersucht.

Aus diesen Tatsachen, in Verbindung mit anderen, hat man sich über den Vorgang der Ionisierung eines Gases folgende genauere Vorstellung gebildet. Durch die Einwirkung der Röntgenstrahlen (des Ionisators — wie erwähnt, gibt es auch andere Mittel, um ein Gas zu ionisieren, also andere Ionisatoren) wird aus einem Gasmolekül ein negatives Elektron abgespalten und der Rest dieses Moleküls bleibt dann positiv zurück. Aber an dieses negative Elektron haften sich sofort eine Anzahl neutraler Moleküle an, die es umhüllen, und dieser größere Komplex von Molekülen mit einem negativen Elektron ist das negative Gasion. Ebenso haften sich an den positiv zurückgebliebenen Rest des zersplitterten Moleküls sofort neutrale Moleküle an und dieser Komplex bildet das positive Gasion. Die Gasionen sind also Körper, welche im allgemeinen groß sind, eine Anzahl Moleküle enthalten, die aber an einen negativen oder po-

sitiven Kern angeheftet sind, ihn wie eine Hülle umgeben. Bei größerer Verdünnung des Gases fallen dann die Moleküle, die an dem negativen Kern sitzen, ab und das negative Elektron bleibt frei für sich bestehen, wie sich bei den Kathodenstrahlen zeigt.

So interessant das Auftreten des Sättigungsstromes in einem ionisierten Gas ist, so beherrscht dieses doch nicht vollständig das Verhalten eines Gases. Wenn man, wie in Fig. 324, ein bestrahltes Gas zwischen zwei Kondensatorplatten steigenden elektromotorischen Kräften unterwirft, so gelangt man bald zum Sättigungsstrom, der sich durch das horizontale Stück der Kurve in dieser Figur darstellt. Steigert man aber die elektromotorische Kraft noch weiter, über die 700 Volt hinaus, die in dieser Figur als Grenze angegeben sind, auf 1000, 2000, 3000 Volt, so bleibt die Kurve nicht horizontal, sondern sie nimmt von einer bestimmten Stelle an wieder einen raschen Aufgang nach oben. Fig. 325 zeigt diesen Verlauf. Macht man von 0 angefangen die Potentialdifferenz, die auf das Gas wirkt, immer größer und größer, so erhält man von 0 an zunächst ein Steigen der Stromstärke bis A, dann den Sättigungsstrom, der durch das geradlinig horizontale Stück von A bis B dargestellt ist. Dann aber bei weiter zunehmender Potentialdifferenz steigt die Stromstärke wieder erheblich an von B bis C und darüber hinaus. Woher kommt nun dieses starke Anwachsen des Stromes nach der Sättigung? Durch den Ionisator werden Gasionen nur in solcher Zahl pro Sekunde erzeugt, daß sie eben bei der Sättigungsstromstärke gerade verbraucht werden, die Stromstärke, soweit sie durch den Ionisator hervorgebracht wird, kann also nicht höher werden, als sie es bei dem Sättigungsstrom ist. Das weitere Anwachsen zeigt aber, daß nun noch viel mehr neue Ionen entstehen. Diese werden durch Stoßionisierung hervorgebracht. Die zunächst erzeugten Gasionen bekommen, wenn die Potentialdifferenz wächst, immer größere Geschwindigkeiten, und wenn diese einen gewissen hohen Wert erreicht hat, so zertrümmern die vorhandenen Gasionen neue, bisher noch neutrale Moleküle und erzeugen dadurch neue Gasionen, so daß nun die Stromstärke wieder wachsen kann und wachsen muß. Wenn dieser Zustand einmal erreicht ist, so ist der Ionisator, der zuerst das Gas leitend machte, ganz überflüssig geworden. Man kann jetzt die bestrahlende Röntgenröhre oder irgend einen anderen zuerst angewendeten Ionisator ganz fortnehmen, und die Leitung durch das Gas hält doch an, weil eben das Gas sich selbst durch Stoß weiter ionisiert. Man kann deshalb bei dem Elektrizitäts-

Fig. 325.



strom in einem Gase zwei Fälle unterscheiden, die unselbständige Strömung, die nur bei einem vorhandenen äußeren Ionisator zu stande kommt, und die selbständige Strömung, die auch ohne äußeren Ionisator fortdauert. In der Fig. 325 ist die Strömung von 0 bis zu der Stelle B eine unselbständige, von da an aber ist sie selbständig.

Solche selbständige Strömung zeigen auch die verdünnten Gase, in denen die Geißlerschen Erscheinungen auftreten. Wenn einmal durch Anlegen einer hohen Spannung an ein solches Rohr die wenigen von vornherein schon vorhandenen Gasionen genügende Geschwindigkeit erhalten haben, so ionisieren sie durch Stoß das Gas weiter und die selbständige Strömung in dem Gas geht nun fort und zeigt sich hierbei als Glimmentladung. Die selbständige Strömung ist immer mit Leuchterscheinungen verbunden. Wir haben oben S. 313 f. schon die Wirkung der Stoßionisierung in den Geißlerröhren besprochen. Aber nicht nur in verdünnten Gasen, sondern auch in Gasen von Atmosphärendruck tritt bei genügend großer angelegter Spannung die selbständige Strömung auf und zwar als Funkenentladung, als elektrischer Funke. Ist dabei die Stromstärke groß genug, so daß die Elektroden und das Gas stark erhitzt werden, so geht der elektrische Funke in das elektrische Bogenlicht über.

Auf diese Weise lassen sich die verschiedenen bei den Gasen auftretenden Entladungsformen durch die Bewegung der Gasionen und die Stoßionisierung erklären. Während die Ionen auch bei dem Stromdurchgang durch Flüssigkeiten eine große Rolle spielen, tritt hier bei den Gasen als neuer und überaus wirksamer Vorgang eben diese Stoßionisation auf, wodurch das Verhalten der Gase so wesentlich anders erscheint als das der Flüssigkeiten.

---

13. Kapitel.

Die Becquerelstrahlen und die Radioaktivität.

Welche ungeahnte Überraschungen die Natur der forschenden Untersuchung zu bieten vermag, das trat selten so klar zu Tage wie bei den Entdeckungen, die die letzten Jahre brachten und welche zeigten, daß eine Erscheinungsform der Elektrizität, die man als Strahlung oder besser Elektronenstrahlung bezeichnen muß, viel allgemeinere Bedeutung hatte, als man früher ahnte.

Eine reiche Ausbeute an strahlenartigen Erscheinungen der Elektrizität boten schon die Crookesschen Röhren. Wir fanden da zunächst die auffallende Erscheinung der Kathodenstrahlen, welche außer der geradlinigen Fortpflanzung die Eigenschaft besitzen, photographische Platten zu belichten, Fluoreszenz und Phosphoreszenz zu erregen und durch sehr dünne Schichten von Körpern, sogar von Metallen hindurchzugehen. Die Erklärung für diese Eigenschaften der Kathodenstrahlen ist, wie wir S. 308 f. ausgeführt haben, die, daß dieselben aus außerordentlich kleinen, negativ geladenen Körperchen, Elektronen, den Atomen der Elektrizität, bestehen, die von der Kathode aus mit sehr großer Geschwindigkeit fortfliegen.

In den Kathodenstrahlen sind die negativen Elektronen, die bei den elektrolytischen Vorgängen immer mit gewöhnlicher Materie fest verbunden vorkommen, frei für sich vorhanden und sie fliegen, vermöge der hohen Spannungen in der Crookesschen Röhre, mit sehr großer Geschwindigkeit von der Kathode fort, einer Geschwindigkeit, die nahezu $^1/_3$ der Lichtgeschwindigkeit ist. Durch diese Auffassung werden insbesondere die Eigenschaften der Kathodenstrahlen erklärt, daß sie erstens jeden Körper, auf den sie treffen, negativ elektrisch laden, und daß sie zweitens, was sehr merkwürdig ist, durch einen Magneten und durch elektrisch geladene Körper aus ihrer Bahn abgelenkt werden. Die Lichtstrahlen laden die Körper nicht, auf die sie treffen, und werden von einem Magneten absolut nicht beeinflußt, so daß hierin ein wesentlicher Unterschied zwischen Kathodenstrahlen und Lichtstrahlen besteht.

Weiter aber fanden wir in den Crookesschen Röhren die Kanalstrahlen, und es hatte sich gezeigt, daß diese aus geschleuderten positiven Teilen bestehen. Sie werden nämlich durch einen Magneten gerade nach der entgegengesetzten Richtung abgelenkt wie die Kathodenstrahlen. Ihre Geschwindigkeit ist ca. 1000mal geringer als die der Kathodenstrahlen, und es ist sicher, daß in ihnen nicht die positiven Elektronen, wenn es solche gibt, frei für sich vorhanden sind, sondern daß sie aus größeren Komplexen von Materie (Gasteilchen), die positiv geladen sind, also wie wir sagen, aus positiven Ionen bestehen.

Eine dritte Art von Strahlen, die aus der Crookesschen Röhre entstehen, ist die bekannteste und für praktische Zwecke die wichtigste, die Röntgenstrahlen. Von ihren Eigenschaften sei hier nur,

wegen des folgenden, an zwei erinnert. Erstens werden die Röntgenstrahlen nicht, wie die Kathodenstrahlen und Kanalstrahlen, durch den Magneten beeinflußt. Sie werden weder nach der einen noch nach der anderen Seite von einem Magneten abgelenkt. Zweitens, und das ist eine positive Eigenschaft, haben sie die Wirkung, die Luft leitend zu machen, zu ionisieren, wenn sie dieselbe durchstrahlen. Um diese Tatsache einfach zu beweisen, braucht man nur ein Goldblattelektroskop zu nehmen und durch einen geriebenen Glasstab oder Ebonitstab die Goldblättchen zu elektrisieren. Dann stoßen sie sich ab und bleiben in der Luft sehr lange Zeit unverändert in der gespreizten Stellung. Sobald man aber in der Nähe Röntgenstrahlen erzeugt, fallen sie sehr rasch zusammen, ein Beweis, daß die Luft die Eigenschaft zu isolieren verloren hat und nun ein Leiter geworden ist.

Während nun aber die Röhren mit sehr verdünnten Gasen, welche uns die Kathoden-, Kanal- und Röntgenstrahlen liefern, Erzeugnisse des menschlichen Scharfsinnes sind, kunstvoll und mühsam gearbeitete Apparate, die noch dazu diese Strahlen erst dann liefern, wenn sie mit einem Induktionsapparat oder einer anderen Quelle hochgespannter Elektrizität betrieben werden, liefert uns die Natur in manchen chemischen Stoffen ganz von selbst, ohne unser Zutun und ohne unsere Kunstfertigkeit, Quellen, welche alle diese drei Strahlenarten oder einige von ihnen fortwährend aussenden und welche außerdem noch eine große Anzahl anderer, bisher nicht bekannter Erscheinungen zeigen. Diese Stoffe nennt man radioaktive Substanzen und ihre Eigenschaft, Strahlen auszusenden, Radioaktivität. Einen ersten solchen Stoff gelang es einem französischen Forscher, Becquerel, in dem Urankaliumsulfat zu finden, einem Stoff, welcher eigentümliche Strahlen aussendet, ganz ähnlich wie die Röntgenröhren. Diese Strahlen gingen durch Holz, Papier, Aluminium hindurch, wie die Röntgenstrahlen, sie schwärzten photographische Platten und erzeugten auch Fluoreszenz. Dann fanden sich noch eine Reihe anderer derartiger Stoffe, welche auch diese sonderbaren Strahlen ausgaben, z. B. das Uranosulfat, das Uranoxyd, das Uransäurehydrat u. a., und schließlich fand Becquerel, daß alle Uransalze und auch das metallische Uran selbst solche Strahlen geben, so daß also diese Eigenschaft an das Atom des Urans gebunden ist. So hatte Becquerel eine neue Art Strahlen gefunden, welche man ursprünglich Uranstrahlen nannte. Jetzt nennt man sie und die ihnen ähnlichen Becquerelstrahlen. Außer den Uranverbindungen erwiesen sich noch die Verbindungen eines anderen seltenen Elements, des Thoriums, als strahlende Körper.

Die Strahlen, die diese Körper aussenden, und die man von den Lichtstrahlen dadurch leicht unterscheiden kann, daß die ersteren durch schwarzes Papier, ja sogar durch dünnes Aluminiumblech hindurchgehen, was die Lichtstrahlen nicht tun, diese Strahlen wirken, wie gesagt, auf photographische Platten (wenn auch erst nach stundenlanger oder sogar tagelanger Exposition), sie erzeugen Fluoreszenz und sie haben insbesondere auch die Eigenschaft, die Luft leitend zu machen, also Elektroskope zu entladen. Je größer der Gehalt eines Körpers an Uran ist, um so größer ist auch diese elektroskopische Wirkung.

Man kann daher sogar diese Wirkung auf das Elektroskop dazu

benutzen, um die Strahlungsfähigkeit dieser Substanzen quantitativ zu vergleichen. Ladet man ein Goldblattelektroskop zu einem bestimmten Ausschlag der Goldblättchen, der z. B. 500 Volt Spannung entspricht, und bringt man verschiedene dieser Salze der Reihe nach in gleichen Gewichtsmengen in die Nähe desselben, so kann man die Zeit messen, in welcher die Goldblättchen um bestimmte Strecken zurückgegangen sind, d. h. man kann die Zeit messen, in welcher die Spannung etwa von 500 Volt auf 400 Volt abgenommen hat. Je kürzere Zeit zu dieser Abnahme notwendig ist, um so stärker leitend ist die Luft geworden, um so stärker strahlend ist der betreffende Körper. Noch einfacher und genauer ist es, den Sättigungsstrom (S. 328) zu beobachten, der in leitend gewordener, ionisierter Luft entsteht, die sich zwischen den Platten eines geladenen Kondensators befindet. Denn die Stärke des Sättigungsstroms ist, wie wir oben gesehen haben, direkt ein Maß für die pro Sekunde durch den Ionisator, also hier durch die strahlende Substanz erzeugten Ionen. Je stärker also der erzeugte Sättigungsstrom ist, um so stärker strahlend ist die Substanz. Die Schnelligkeit der Entladung eines Elektroskops oder die Stärke des erzeugten Sättigungsstromes ist danach ein Maß für die Größe der Radioaktivität der Körper.

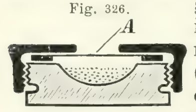
Mit solchen quantitativen Messungen an verschiedenen uranhaltigen Stoffen beschäftigte sich in Paris Frau Curie und sie fand, daß die sogenannte Uranpechblende aus Joachimsthal in Böhmen eine außerordentlich starke strahlende Wirkung hatte, eine viermal größere wie das metallische Uran selbst. Daraus schloß sie mit Recht, daß diese Wirkung nicht vom Uran selbst herrühren könne, sondern daß in der Pechblende noch ein weiterer strahlender oder radioaktiver Stoff vorhanden sein müsse, und sie ging daran, ihn durch chemische Behandlung der Pechblende zu isolieren. Durch mühsame Arbeit, bei der immer das Elektroskop als Reagenzmittel diente, gelang es ihr schließlich, zwei Körper aus der Pechblende abzuscheiden, welche viele hunderttausendmal stärker aktiv waren, wie die Pechblende selbst und wie das Uran. In der Joachimsthaler Pechblende sind nämlich außer dem Uran noch eine ganze Reihe anderer Metalle, wenn auch in kleinen Quantitäten, enthalten. Die beiden so stark aktiven Körper ließen sich zunächst nicht für sich allein abscheiden, sondern traten immer in Verbindung mit zwei sonst in der Pechblende vorhandenen Metallen auf, nämlich mit Wismut und mit Barium; man erhielt radioaktives Wismut und radioaktives Barium. Da die Eigenschaften des radioaktiven Wismuts und die des Bariums sehr verschieden waren (bei dem ersten verschwand die Aktivität nach einiger Zeit, bei dem zweiten blieb sie dauernd bestehen), so nahm Madame Curie eben zwei aktive Körper an, das Polonium, welches dem Wismut, und das Radium, welches dem Barium beigemengt sei. Weitere Untersuchungen haben jedoch einerseits gelehrt, daß das Polonium kein selbständiger aktiver Körper neben dem Radium ist, sondern erst aus dem Radium entsteht, daß dagegen sich sicher noch ein weiterer radioaktiver Körper aus der Pechblende abscheiden läßt, nämlich das Aktinium, das chemisch sich wie Thorium verhält. Übrigens wird aus der Pechblende das radioaktive Barium nicht als Metall abgeschieden, sondern als Metallsalz, und zwar als aktives Chlorbarium oder Brombarium oder Bariumcarbonat.

Durch fortgesetzte Arbeit gelang es dann aber, das Radium ganz oder fast ganz von dem Barium zu trennen. Es zeigte sich nämlich, daß das Chlorsalz, und namentlich das Bromsalz des Radiums weniger löslich sind als die entsprechenden Salze des Bariums. Durch fortgesetzte Lösung und Auskristallisierung des radioaktiven Chlorbariums oder Brombariums gelang es schließlich, diese Substanz in zwei Portionen zu trennen, von denen die eine nur das inaktive Bariumsalz enthielt, während die zweite Portion die neue Substanz, das Chlorradium resp. Bromradium in großer Reinheit war. Der Beweis dafür wurde zunächst durch die Spektralanalyse geführt. Die fortgesetzte Reinigung des aktiven Bariums ließ schließlich die Bariumlinien aus dem Spektrum vollständig verschwinden und man erhielt ein neues, sonst unbekanntes Spektrum, das sich hauptsächlich durch einige violette Linien auszeichnet, und welches eben das des Radiums ist. Während eine Flamme durch Chlorbarium grün gefärbt wird, wird sie durch Chlorradium rot gefärbt. Frau Curie konnte auch das Atomgewicht des Radiums bestimmen, welches sich zu 225 ergab, und es zeigte sich, daß das Radium, das Thorium und das Uran die schwersten aller Atome besitzen, die größten Atomgewichte haben, nämlich Radium 225, Thorium 232, Uran 240. In jüngster Zeit gelang es Frau Curie auch, das Radium selbst als Metall zu erhalten, also es aus seiner Verbindung mit Chlor oder Brom herauszuziehen.

Die Herstellung der reinen Radiumsalze ist eine außerordentlich mühsame. Aus Tausenden von Kilogrammen Pechblende erhält man einige Dezigramm Radiumsalz. Daher ist auch der Preis des Radiums ein enormer. Ein Milligramm kostet heute über 400 Mark, während ein Milligramm Gold noch nicht 0,3 Pfennig wert ist. Die gesamte Menge des Radiums, die jetzt auf der Welt rein vorhanden ist, beträgt höchstens 20 Gramm. Die Pechblende von Joachimsthal in Böhmen, aus welcher das Radium gewonnen wird, wird von der österreichischen Regierung jetzt vollständig von aller Ausfuhr gesperrt und wird vielmehr in Österreich selbst amtlich auf Radium verarbeitet. Außer in Böhmen sind Fundorte für Pechblende noch in Sachsen (Johanngeorgenstadt u. a.), Cornwall in England, ferner in Colorado und Süd-Dakota in Amerika.

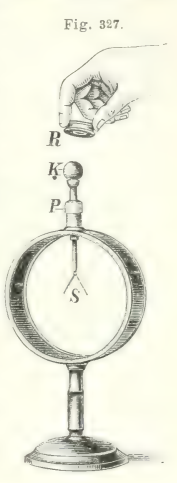
Von den verschiedenen radioaktiven Substanzen, dem Uran, Radium, Aktinium, Thorium, zeigt das Radium, wegen der Reinheit, in der es hergestellt wird, die Eigenschaften der Becquerelstrahlen in besonders starkem Maße, so daß man hauptsächlich mit Radium wissenschaftlich und praktisch operiert. (In der letzten Zeit hat man in dem Mesothorium, das aus den Rückständen des Monazits bei der Thoriumgewinnung erhalten wird, einen radioaktiven Körper von fast ebenso großer, aber allerdings rascher abnehmender Strahlungsfähigkeit, wie das Radium, in den Handel gebracht.) Das Radiumsalz wird gewöhnlich in eine Kapsel eingeschlossen, deren Konstruktion aus Fig. 326 zu ersehen ist. Eine Kapsel aus Messing oder Ebonit enthält eine Vertiefung, in die das Salz eingebracht ist. Das Salz ist von einer Glimmerplatte oder einer dünnen Aluminiumplatte bedeckt. Auf die Kapsel ist eine Messingkappe aufgeschraubt, die in der Mitte ein Loch hat, so daß die Strahlen durch die Glimmerplatte oder Aluminiumplatte A nach außen dringen können.

Fig. 326.



Die Becquerelstrahlen machen, und das ist eine ihrer wichtigsten Eigenschaften, die Luft, durch welche sie strahlen, zu einem Leiter, sie ionisieren die Luft. Radium wirkt darin zwar nicht so stark, wie die Röntgenstrahlen, aber doch außerordentlich viel kräftiger wie etwa die Uransalze. Wenn man in Fig. 327 das Elektroskop etwa durch Berührung des Knopfes K mit einem geladenen Glasstab oder Ebonitstab ladet, so daß die Goldstreifchen S divergieren, und nun mit der Hand eine solche Kapsel mit einem Zehntelmilligramm Radium in die Nähe bringt, so fallen die Goldblättchen in weniger als einer Sekunde zusammen, weil eben die leitend gewordene Luft die Ladung des Elektroskops zur Erde führt.

Fig. 327.



Man kann die Ionisierung der Luft noch durch ein anderes Experiment zeigen, das in Fig. 328 dargestellt ist. Man verbindet ein Funkenmikrometer C mit einem Induktionsapparat J. Die Kugeln des Mikrometers werden so weit voneinander entfernt, daß gerade die Schlagweite des Induktionsapparates erreicht ist. Macht man nun den Kugelabstand in C noch etwas größer, so gehen keine Funken mehr über. Wenn man aber nun in die Nähe von C die Kapsel R mit Radium hält, so springen die Funken sofort wieder über. Denn die Luft in der Nähe von C ist nun leitend geworden und es ist eine viel geringere

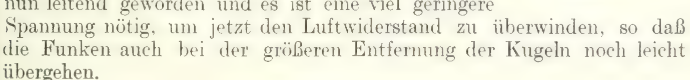
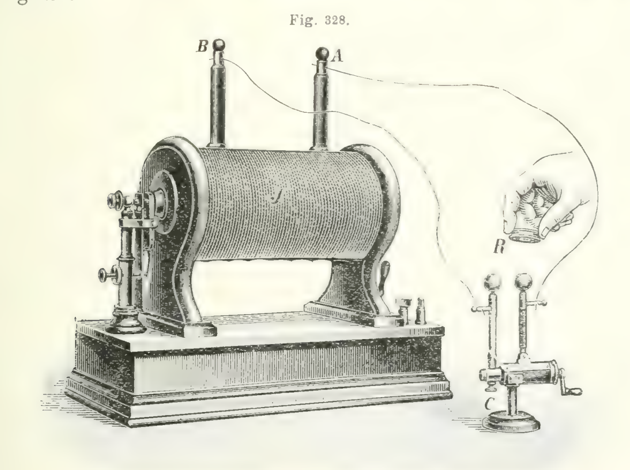
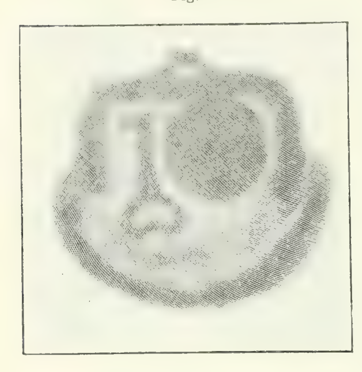

Spannung nötig, um jetzt den Luftwiderstand zu überwinden, so daß die Funken auch bei der größeren Entfernung der Kugeln noch leicht übergehen.

Fig. 328.



Photographische Platten werden durch Radiumsalze geschwärzt und zwar auch durch Papier, Holz, dünnes Metall hindurch. Die Unterschiede in der Durchstrahlbarkeit sind aber für verschiedene Körper lange nicht so erheblich wie für die Röntgenstrahlen. Fleisch und Knochen z. B. lassen die Becquerelstrahlen merklich gleich hindurch, so daß es nicht möglich ist, ein Knochenbild der Hand durch sie zu bekommen. Eine photographische Aufnahme eines Portemonnaies mit einer Münze und einem Schlüssel, die von Frau Curie herrührt, ist in Fig. 329 abgebildet. Die Schärfe dieses Schattenbildes ist, wie man sieht, nicht vergleichbar mit derjenigen, die man bei Röntgenbildern erhält.

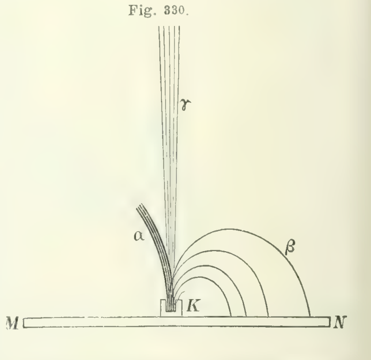
Fig. 329.



Auch Fluoreszenzschirme werden von den Radiumsalzen zum Leuchten gebracht, aber auch diese Wirkung ist viel schwächer wie bei den Röntgenstrahlen. Immerhin kann man einen phosphoreszierenden Körper wie Willemit, wenn man ihn in die Nähe von (freiem, nicht eingeschlossenem) Radium bringt, zu so hellem Leuchten kommen sehen, daß man dasselbe im hellen Zimmer beobachten kann.

Die nähere physikalische Untersuchung der Radiumstrahlung, ebenso wie der Strahlung des Thoriums, hat nun gezeigt, daß diese eine recht komplizierte, zusammengesetzte ist. Dreierlei Art von Strahlen sendet das Radium aus, die man als α-, β-, γ-Strahlen unterscheidet. Am deutlichsten offenbaren sich die Unterschiede dieser Strahlungen, wenn man einen Magneten in die Nähe des Gefäßes bringt, in welchem das Radium sich befindet.

Fig. 330.



Es sei K in Fig. 330 ein kleines Gefäß, welches etwas Radiumsalz enthält, und wir denken uns einen kräftigen Magneten mit einem Pole dicht vor das Gefäß gebracht. Dann gibt es, wie die Figur andeutet, einen Teil der Strahlen, welcher trotz der Anwesenheit des Magneten geradlinig herausgeht. Es sind das die unablenkbaren Strahlen, welche man als γ-Strahlen (Gamma-Strahlen) bezeichnet. Die anderen Teile der Strahlung aber sind ablenkbar. Aber unter diesen gibt es wieder einen Teil, welcher bei der angenommenen Lage des Magnetpols etwa nach rechts, und zwar ziemlich

stark, einen anderen, welcher gerade umgekehrt nach links, und zwar ziemlich schwach, abgelenkt wird. Die ersteren nennt man β-Strahlen (Beta-Strahlen), die letzteren α-Strahlen (Alpha-Strahlen). Diese drei Strahlenarten nun verhalten sich ganz so wie die drei Strahlengattungen in der Crookesschen Röhre, von denen oben gesprochen wurde. Die β-Strahlen führen nämlich negative Ladung mit sich, sie entsprechen den Kathodenstrahlen. Die α-Strahlen sind positiv geladen und entsprechen den Kanalstrahlen, die γ-Strahlen, die unablenkbar sind, verhalten sich wie die Röntgenstrahlen.

Die β-Strahlen führen, wie gesagt, negative elektrische Ladung mit sich. Ganz wie die Kathodenstrahlen laden sie die Körper, auf die sie fallen, negativ elektrisch, sie gehen durch dünne Schichten von fremden Substanzen hindurch, durch dünnes Papier, Glas, aber auch durch dünne Metalle, sie werden von Magneten und von elektrostatisch geladenen Körpern ebenso und in derselben Richtung wie die Kathodenstrahlen abgelenkt, kurz sie bestehen wie die Kathodenstrahlen aus negativen Elektronen. Ja man konnte auch bei ihnen aus der magnetischen und der elektrostatischen Ablenkung, welche sie erfahren, berechnen, wie groß ihre Geschwindigkeit und ihre spezifische Ladung ist, und es ergab sich, daß ihre spezifische Ladung etwa dieselbe ist, wie die der negativen Elektronen in einer Crookesschen Röhre, daß sie aber eine noch fast dreimal so große Geschwindigkeit besitzen wie die Kathodenstrahlen, daß also ihre Geschwindigkeit die des Lichts fast erreicht. Die β-Strahlen bestehen also aus sehr rasch bewegten negativen Elektronen.

Die zweite Sorte von ablenkbaren Strahlen, die α-Strahlen, sind positiv geladen und entsprechen durchaus den Kanalstrahlen. Sie lassen sich von den β-Strahlen leicht trennen, indem man diese durch einen Magneten zur Seite biegt. Auch die α-Strahlen werden von dem Magneten beeinflußt, aber sehr schwach, so daß man erst in sehr starken magnetischen Feldern ihre Ablenkbarkeit beobachten kann, die dann eben nach der entgegengesetzten Richtung geschieht, wie die der β-Strahlen. Dadurch wird aber bewiesen, daß sie geladene und zwar positiv geladene Teilchen enthalten. Dasselbe beweist auch die Tatsache, daß sie in einem elektrostatischen Feld, zwischen zwei geladenen Kondensatorplatten, abgelenkt und zwar nach der negativ geladenen Platte hingezogen werden. Aus der Größe dieser beiden Ablenkungen, der im magnetischen und der im elektrostatischen Feld, konnte man nun ebenso wie bei den Kathodenstrahlen und Kanalstrahlen (o. S. 310 f.) sowohl die Geschwindigkeit der α-Teilchen, wie ihre spezifische Ladung bestimmen. Die Geschwindigkeit ergab sich etwa 50- bis 100mal so groß, wie die der Kanalstrahlen. Aus dieser größeren Geschwindigkeit folgt, daß die α-Strahlen weniger leicht von fremden Körpern absorbiert werden als die Kanalstrahlen. Trotzdem sind sie viel leichter absorbierbar, als die β-Strahlen. Schon durch dünnes Papier werden sie vollkommen absorbiert, ebenso durch eine Aluminiumschicht von 0,02 mm Dicke. Ja auch die Luft und andere Gase absorbieren sie erheblich. Schon nach Durchlaufung einiger Zentimeter Luft hört ihre Wirkung, sowohl die ionisierende wie die photographische plötzlich auf. Die Strecke, in welcher sich die α-Strahlen durch Luft hindurch bewegen können, bis ihre Wirkung plötzlich verschwindet, nennt man ihre Reichweite.

Je nach der Geschwindigkeit, mit welcher die α-Teilchen von der radioaktiven Substanz fortgeschleudert werden, beträgt die Reichweite 3—7 cm. Außer der Geschwindigkeit ergab sich aber aus den Messungen der elektrostatischen und magnetischen Ablenkung auch wieder die spezifische Ladung der Teilchen, d. h. das Verhältnis ihrer Ladung zu ihrer Masse. Und zwar fand Rutherford für dieses Verhältnis den Wert 50 700 (Coulomb pro Gramm). Wenn wir daran denken, daß bei der Elektrolyse die spezifische Ladung des Wasserstoffions sich zu 96 540 Coulomb pro Gramm ergab, so erkennt man zunächst, daß in den α-Teilchen die positiven Ladungen wieder nicht frei vorkommen, daß sie keine positiven Elektronen sind, sondern daß sie auch hier mit Massen verbunden sind, die die Größenordnung der gewöhnlichen Atome haben. Eine weitere wichtige Frage aber ist die, welcher Art sind die Massen, die hier positiv elektrisch erscheinen, aus welchem Stoff bestehen die α-Teilchen?

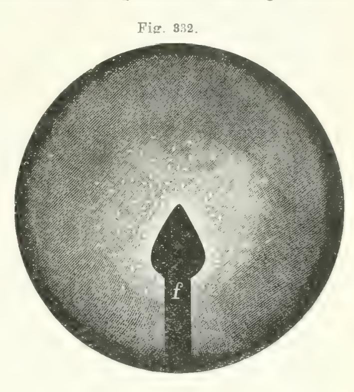
Diese wichtige, aber offenbar sehr schwierig zu beantwortende Frage hat eine überraschende Antwort erfahren, und zwar durch die genaue Verfolgung einer sehr reizvollen Beobachtung, die zuerst Crookes gemacht hat, und die von den α-Strahlen herrührt. Das Zinksulfid ist ein phosphoreszierender Körper, welcher wie durch gewöhnliches Licht, so auch durch Radiumstrahlen zum Leuchten gebracht wird, und zwar konnte man durch magnetische Ablenkung der β-Strahlen zeigen, daß die α-Strahlen es sind, welche das Leuchten des Zinksulfids hervorbringen. Wenn man nun einen mit Zinksulfid bestrichenen Karton, einen Zinksulfidschirm, von einem Stückchen Radium bestrahlen läßt und im Dunkeln die erregte Phosphoreszenz mit einer Lupe vergrößert betrachtet, so sieht man nicht etwa ein gleichmäßiges Leuchten, sondern ein Szintillieren. Die Teilchen des Kartons werden abwechselnd bald da, bald dort zum Leuchten gebracht, der Anblick ist so, wie wenn der Mond sich in fließendem Wasser spiegelt.

Fig. 331.

Sehr bequem kann man diese Erscheinung mit einem kleinen Apparat beobachten, den man Spintheroskop (von σπινθήρ, Spinther, Funken) nennt. Er ist in Fig. 331 im Durchschnitt gezeichnet. Eine Messinghülse a trägt am Boden ein Stück Zinksulfidpapier Z. Über demselben, in etwa 1 mm Entfernung, ist ein kleiner Zeiger f angebracht, welcher ein winziges Stückchen Radium r trägt. Der Zeiger läßt sich von außen durch das Rädchen R drehen. Durch die verschiebbare Lupe L kann man auf den Schirm genau einstellen. Beobachtet man nun durch die Öffnung in der Deckplatte des Apparates, so sieht man eine Erscheinung, die durch Fig. 332 angedeutet ist. Vollkommen läßt sie sich im Bilde nicht fixieren, weil sie eben besonders durch die raschen Wechsel, das Szintillieren, ausnehmend reizend ist. Die Erscheinung macht den Eindruck, als ob jedes α-Teilchen, das von dem Radium fortgeschleudert wird, wenn es auf den Zinkschirm trifft, einen solchen Lichtblitz erzeugt. Man kann nun bei geeigneten Maßregeln direkt zählen, wie viel solcher Lichtblitze von einem bestimmten Präparat in jeder Sekunde ausgehen, also wie viele α-Teilchen

das Präparat pro Sekunde aussendet. Wenn man zugleich mißt, wie groß die gesamte von diesen α-Teilchen pro Sekunde mitgeführte positive Ladung ist, so hat man das interessante Resultat, daß man ganz direkt messen kann, wie groß die Ladung ist, die jedes einzelne α-Teilchen trägt. Durch solche Messungen ergab sich das merkwürdige Resultat, daß jedes α-Teilchen eine doppelt so große (aber natürlich positive) Ladung besitzt, wie ein negatives Elektron, daß jedes α-Teilchen also zweimal das Elementarquantum (o. S. 143) trägt, so daß man sagen kann, jedes α-Teilchen enthält zwei positive Elektronen. (Diese Aussage bleibt auch gültig, wenn es keine eigentlichen positiven Elektronen gibt, sondern wenn ein Körper dann positiv elektrisch erscheint, falls er ein negatives Elektron oder mehrere verloren hat.)

Fig. 332.



Nach dieser Feststellung aber läßt sich die oben aufgeworfene Frage, welches der Stoff sei, aus dem die α-Teilchen bestehen, sofort beantworten. Bei gleicher Ladung würde sich die Masse eines α-Teilchens zu der eines Wasserstoffatoms wie 96 540 : 50 700 verhalten. Da aber das α-Teilchen, wie gezeigt, die doppelte Ladung trägt, so verhalten sie sich wie 96 540 zu 25 350 oder rund wie 4 : 1. Die Masse eines α-Teilchens ist also 4mal so groß wie die Masse eines Wasserstoffatoms, oder das α-Teilchen hat das Atomgewicht 4. Nun wissen wir aber aus der Chemie, daß ein interessanter gasförmiger Stoff, nämlich das Helium, das Atomgewicht 4 besitzt. Also müssen wir schließen, die α-Teilchen sind Heliumatome, welche mit zwei positiven Elektronen verbunden sind.

Diese äußerst interessante und wichtige Aufklärung verdankt die Wissenschaft dem englischen Forscher Rutherford, der überhaupt das meiste dazu beigetragen hat, die komplizierten Erscheinungen der Radioaktivität unserem Verständnis näher zu bringen.

Der Hauptteil der ganzen Strahlung der radioaktiven Substanzen besteht aus α-Strahlen.

Endlich die dritte Art von Strahlen, die von einem Radiumsalz ausgehen, die γ-Strahlen, verhalten sich sehr ähnlich wie die Röntgenstrahlen. Sie sind durch Magnete unablenkbar wie diese, sie gehen durch dicke Schichten von Körpern hindurch, sogar durch mehrere Zentimeter dicke Metallplatten, sind die durchdringendsten der drei Strahlenarten und haben also die Eigenschaften der Röntgenstrahlen und zwar sehr harter Röntgenstrahlen. Ebenso wie die Röntgenstrahlen sind daher vermutlich die γ-Strahlen keine Elektronenstrahlungen, sondern Ätherstrahlungen. Sie entstehen nach der oben S. 327 angeführten Stokesschen Theorie immer dann, wenn Elektronen oder Ionen in ihrem Flug gehemmt

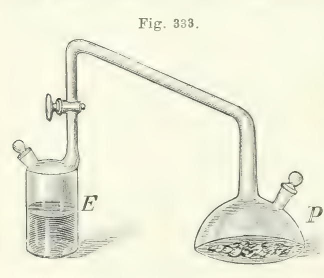
werden, wenn sie eine rasche Bremsung erfahren, und bestehen in den Stößen, die der Äther durch die Bremsung der Elektronen erfährt und die sich im Äther rasch ausbreiten.

Außer dieser Aussendung von Strahlen zeigen aber die radioaktiven Körper, das Radium, Thorium und Aktinium, noch eine weitere höchst auffallende Wirkung, die sehr bald nach der Auffindung der radioaktiven Substanzen entdeckt, aber erst später verständlich wurde. Es zeigte sich nämlich, daß alle Körper, die eine Zeitlang in der Nähe dieser radioaktiven Körper sich befinden, vorübergehend selbst radioaktiv werden. Man sagt, sie enthalten induzierte oder mitgeteilte Radioaktivität. Wenn das Radium dagegen in ein Gefäß eingeschlossen ist, so vermag es die benachbarten Körper außerhalb des Gefäßes nicht zu induzieren. Die induzierte Aktivität von Körpern nimmt mit der Zeit ab und verschwindet allmählich ganz. So lange sie besteht, zeigt sie sich darin, daß die induzierten Körper ebenfalls die Luft ionisieren und auf photographische Platten wirken.

Das Geheimnis dieser induzierten Aktivität lüftete sich erst durch eine weitere von Rutherford gemachte Beobachtung. Er fand nämlich, daß das Radium, wie auch das Thorium und das Aktinium (Uran und Polonium aber nicht), fortwährend ein Etwas aussenden, das man eine Emanation nennt. Trockenes Radium allerdings zeigt dieses Etwas nur in sehr geringem Grade, aber wenn man das Radiumsalz in Wasser auflöst, so zeigen sich in seiner Nähe elektrische Wirkungen an, welche die besondere Eigentümlichkeit haben, daß sie durch jeden Luftstrom beeinflußt werden, während die drei erwähnten Strahlenarten ganz unabhängig von jeder Luftbewegung aus dem Radium austreten. Das diese Wirkungen Hervorbringende nennt man Emanation.

Die Emanation verhält sich wie ein leicht bewegliches Gas, welches aus dem Radium sich entwickelt, und zwar sind seine elektrischen Wirkungen derart, als ob es positiv geladen ist, also aus α-Teilchen besteht. Die Emanation zeigt ionisierende Wirkung auf die Luft, mit der sie gemischt ist, und sie hat die Fähigkeit, Körper, mit denen sie in Berührung ist, zum phosphoreszierenden Leuchten zu bringen. Glasgefäße, in denen die Emanation sich befindet, leuchten im Dunkeln. Um andere Substanzen, verschiedene Mineralien, unter dem Einfluß der Emanation zum Leuchten zu bringen, kann man sich des Apparates Fig. 333 bedienen. In diesem ist E ein Glasgefäß mit Wasser, in welchem ein wenig Radiumsalz aufgelöst ist. Über dem Wasser befindet sich die Emanation, welche durch das Rohr in das Gefäß P dringt, auf dessen Boden die Mineralien verteilt sind, deren Phosphoreszenzfähigkeit unter der Wirkung der Emanation man untersuchen will. Die Emanation geht nicht wie die Strahlen geradlinig fort, sondern sie verbreitet sich in dem ganzen Raum wie ein Gas. Man kann nun

Fig. 333.



allerdings absolut nichts von einer Gasentwicklung am Radium merken. Das Radium verliert nichts an Gewicht. Sein Gewicht bleibt, soweit die genauesten Wägungen festzustellen gestatten, in Jahren dasselbe. Läßt man die Emanation in ein ausgepumptes Gefäß eintreten, so kann man nicht eine Spur von Druckerhöhung mit den besten Manometern wahrnehmen. Trotzdem muß die Emanation etwas wie ein materielles Gas sein, denn sie hat alle Eigenschaften eines Gases. Bringt man sie in ein Gefäß, welches man dann durch einen Hahn mit einem zweiten Gefäß in Verbindung setzt, so teilt sich die Emanation zwischen beide Gefäße im Verhältnis ihrer Volumina, so wie es ein Gas tut. Die Emanation geht durch enge Röhren langsam hindurch, sie diffundiert wie ein Gas durch dieselben, was man an ihrem Leuchten erkennt. Man kann die Emanation sogar zum Gefrieren bringen. Wenn man die Emanation in einem Glasrohr hat und dieses durch flüssige Luft auf —190° C. abkühlt, so hören die Wirkungen der Emanation vollständig auf, sie scheinen verschwunden zu sein. Erwärmt man das Rohr wieder, so erscheint auch die Wirkung von neuem, ganz so, als ob die Emanation eingefroren und dann wieder aufgetaut wäre. Genaue Messungen haben gezeigt, daß sie bei —150° schon einfriert.

Fig. 334.

Man kann die Kondensation der Emanation durch Kälte und ihre Wiedervergasung durch Erwärmung durch einen schönen von Soddy herrührenden Versuch deutlich und sogar für ein größeres Auditorium sichtbar machen. Zu dem Zweck dient der Apparat, der in Fig. 334 gezeichnet ist. Man löst einige Milligramm Radiumbromid in Wasser in einer Flasche A auf. Es entwickelt sich sofort über der Lösung die Emanation. Durch einen ganz langsamen Luftstrom treibt man diese in das lange enge Rohr C D, in welchem man an einigen Stellen $\alpha\ \alpha$ kleine Diamantsplitter eingelegt hat. Dann beobachtet man im Dunkeln an dem Leuchten der Diamanten, wann die Emanation dieselben erreicht hat. Die Emanation dringt dann bei D in die Glasspirale ein, welche von einem doppelwandigen Glasgefäß G umgeben ist. Hinter der Spirale ist ein langes Glasrohr F angebracht, in welchem ein langer Glimmerstreifen befestigt ist, der mit Zinkblende bestrichen ist. Wenn die Emanation diesen erreicht, so leuchtet er unter ihrem Einfluß. Gießt man nun aber in das Gefäß G (eine sogenannte Dewarsche Flasche) flüssige

Luft (Temperatur — 190°), so wird die Emanation in der Spirale kondensiert, trotz des Luftstromes erreicht sie F nicht, die Zinkblende bleibt dunkel. Nimmt man nun das Gefäß G fort, so daß die Spirale sich erwärmt, so taut die Emanation wieder auf und wird nun von dem Luftstrom nach F geführt. Während sie dort in die Höhe steigt, bringt sie auf dem *Zinksulfidschirm* eine Zone glänzenden Leuchtens, Fluoreszierens hervor.

Hebt man die Emanation längere Zeit in einem Gefäß auf, so verschwindet allmählich das Leuchten.

Die Emanation ist nun auch die Ursache der induzierten, der mitgeteilten Radioaktivität. Denn wenn ein Gas auch nur in geringen Mengen von dem Radium ausgeht, so kann dasselbe auf andere Körper sich niederschlagen und dadurch diese aktiv machen. Aber wenn auch die Emanation die Ursache der induzierten Aktivität ist, so ist sie doch, wie wir sehen werden, nicht mit ihr identisch.

Durch die dreierlei verschiedenen Arten von Becquerelstrahlen und durch die Emanation gibt ein Stück Radium fortwährend Energie nach außen ab. Der Betrag dieser Energie, der auf die β- und γ-Strahlen fällt, ist ein sehr geringer. Aber eine äußerst wichtige Beobachtung zeigt, daß es sich bei diesen radioaktiven Erscheinungen noch um viel größere Energiemengen handelt, als man ursprünglich annehmen konnte. Das Radium strahlt nämlich auch fortwährend Wärme aus. Curie hat die merkwürdige Tatsache entdeckt, und sie ist von verschiedenen Seiten bestätigt und quantitativ geprüft worden, *daß ein Stück Radium immer eine Temperatur hat, die um zirka 1—2° höher ist als die Umgebungstemperatur.* Bringt man es in einen Raum von 20°, so hat es 21°, bringt man es in einen Raum von 40°, so hat es 41°. Infolge der höheren Temperatur gibt es also immer Wärme durch Leitung und Strahlung an die Umgebung ab, und zwar haben messende Versuche ergeben, daß 1 g Radium pro Stunde 118 Kalorien nach außen abgibt. Daraus folgt, daß, um bloß die Wärmeabgabe nach außen zu decken, ein solches Gramm pro Stunde auch einen Betrag von Energie, der 118 Kalorieen äquivalent ist, entweder von außen aufnehmen muß, oder aber, daß dieser Betrag durch innere Umwandlung frei werden muß.

Die Tatsache, daß ein Stück Radium fortgesetzt und ununterbrochen negative Elektronen und positive Ionen aussendet, hat zu einer Hypothese geführt, welche einen weitreichenden Ausblick in die Fortentwicklung der Physik und Chemie gewährt. Wenn die Elektronen fortwährend ausgesendet werden, so führt das fast notwendigerweise zu der Annahme, daß diese Elektronen schon in dem Körper vorhanden seien und daß die *Atome* der Körper in Wirklichkeit nur Zusammensetzungen von Elektronen in verschiedenfacher Anordnung seien. Nach dieser Hypothese sind die Atome selbst zusammengesetzte Körper und es wird nur von den angewandten Mitteln abhängen, ob man ein Atom, ein scheinbar Unteilbares, nicht doch zerteilen kann, eine Anschauung, die übrigens nicht neu ist, sondern nur durch die Auffassung der Elektronen als der Teile der Atome präzisiert ist. Die radioaktiven Stoffe nun lassen sich danach auffassen als Stoffe, deren Atome in einem labilen Zustand sind, so daß sie sich in einem dauernden Prozeß der Zersetzung be-

finden. Die Tatsache wenigstens, daß die β-Strahlen aus negativen Elektronen bestehen, findet die einfachste Erklärung darin, daß eben die Elektronen in dem Radiumatom schon enthalten sind und von demselben fortfliegen. Ebenso würden die α-Strahlen aus größeren Partikeln des Atoms bestehen, nämlich aus doppelt positiv geladenen Ionen, die, wie wir gesehen haben, Heliumatome sind, welche also in dem Atom des Radiums enthalten sein müssen, oder aus ihm sich bilden können. Man kann darauf hinweisen, daß gerade die größten und schwersten Atome (das Uran, Radium, Thorium) derartige labile Körper sind, ebenso wie nach der Kant-Laplaceschen Theorie des Sonnensystems auch die größten Himmelskörper am leichtesten Teile (Monde, Ringe) absondern müssen, ihren Zusammenhang nicht mehr festhalten können.

Das ist allerdings nur eine Hypothese, welche aber erlaubt, sich eine Vorstellung zu machen, wie die merkwürdigen Eigenschaften des Radiums zusammenhängen können, während man sich ohne diese Hypothese kein begreifliches Bild der vielen und komplizierten Phänomene der Radioaktivität machen kann. Und diese Hypothese hat allmählich so viel Bestätigungen, zum Teil sehr überraschender Art gefunden, daß man sie als mehr denn als eine Hypothese, vielmehr als eine wirkliche Erklärung, als eine Theorie ansehen kann. Man nennt sie die Theorie des Atomzerfalls. Sie ist von Rutherford und Soddy zuerst aufgestellt und durch eine große Reihe merkwürdiger Versuche gestützt worden.

Wenn man diese Theorie im Auge behält, so kann man sich leichter ein Bild von den sonderbaren Erscheinungen machen, die ein näheres Studium der radioaktiven Substanzen zu Tage gebracht hat. Wenn man die Emanation des Radiums in ein mit Luft gefülltes Gefäß bringt und dann das Gefäß schließt und die Emanation sich selbst überläßt, so bleibt die Wirkung der Emanation (die sich durch Leitendwerden der Luft zu erkennen gibt) nicht etwa auf unveränderlicher Höhe, sondern sie sinkt allmählich herunter und zwar so, daß die Abnahme in bestimmter Zeit immer derselbe Bruchteil der zuerst vorhandenen Wirkung ist. In 4 Tagen etwa (genauer 3,71 Tagen) sinkt die Wirkung der Emanation auf die Hälfte der Anfangswirkung, in weiteren 4 Tagen auf ein Viertel u. s. f. Es wurde z. B. von Rutherford ein Quantum Luft, das mit Radiumemanation gemischt war, in ein Gefäß gebracht, das als Kondensator anzusehen ist. Es bestand aus einem Hohlzylinder mit metallischen Wänden und enthielt in seiner Mitte, isoliert durchgeführt, einen Draht. Die Zylinderwand ist die eine, der Draht die andere Belegung des Kondensators, und es wurde nun der durch die ionisierte Luft gehende Sättigungsstrom gemessen. Hatte dieser im Anfang eine Stromstärke, die als 100 bezeichnet werden möge, so wurden innerhalb 787 Stunden folgende weitere Stromstärken gefunden:

Zeit in Stunden	Stromstärke
0	100
20,8	85,7
187,6	24,0
354,9	6,9
521,9	1,5
786,9	0,19

Man sieht unmittelbar, daß nach 187,6 Stunden, das sind etwa 2mal 3,71 Tagen die Wirkung der Emanation auf $^{1}/_{4}$ gefallen ist, und nach 354,9 Stunden, das sind 4mal 3,71 Tage, auf $^{1}/_{16}$ heruntergegangen ist. Dieses Gesetz der Abnahme und diese Zahl von 3,71 Tagen zeigt sich bei der Radiumemanation immer erfüllt, so daß es ganz gleichgültig ist, ob die Emanation in Luft oder in anderen Gasen sich befindet, ob das Gefäß groß oder klein ist, ob viel oder wenig Emanation zunächst vorhanden war. Die Emanation des Thoriums sinkt dagegen schon in 60 Sekunden auf den halben Betrag, die des Aktiniums sogar schon in 3,9 Sekunden. Diese Zeiten, die man als *Abklingungskonstanten* oder *Halbwertszeiten* bezeichnet, sind so charakteristisch, daß man bei einer unbekannten Emanation aus der Messung der Zeit, in der ihre Wirkung auf die Hälfte heruntergeht, also aus der Abklingungskonstante, mit Sicherheit schließen kann, ob man es mit einer Emanation des Radiums, Thoriums, Aktiniums oder mit einer anderen Art der Emanation zu tun habe.

Nach der oben angeführten Vorstellung des Atomzerfalls zerfällt das Radiumatom in einen Bestandteil, welcher eben die Emanation ist, und in einen anderen Bestandteil, nämlich in ein α-Teilchen. Die Emanation aber bleibt selbst nicht unverändert, sondern sie zerfällt auch und zwar, wie erwähnt, wird in etwa 4 Tagen die Hälfte von ihr von neuem in andere Stoffe verwandelt.

Durch diese Umwandlung der Emanation bildet sich nun derjenige Stoff, der den in der Nähe des Radiums befindlichen Körpern die *induzierte Aktivität* verleiht. Diese induzierte oder mitgeteilte Aktivität tritt nur auf, wenn Radium*emanation* vorhanden ist, sie ist also von dieser veranlaßt. Aber es ist nicht etwa die Emanation selbst, welche sich auf den Wänden der Gefäße oder auf hineingebrachten Körpern festsetzt. Denn wäre sie es selbst, so müßte die mitgeteilte Aktivität auch ebenso wie die Emanation in 3,71 Tagen auf die Hälfte herabsinken. Das ist aber nicht der Fall, sondern sie verschwindet viel rascher. Schon in 29 Minuten sinkt sie (im großen und ganzen genommen) auf die Hälfte herab. Es ist also folgerichtig anzunehmen, daß die Radiumemanation ebenfalls keine beständigen Atome besitzt, sondern daß diese selbst in eine neue Materie zerfallen, welche sich an festen Körpern festsetzt und eben die induzierte Aktivität hervorbringt. Beim Thorium zerfällt, wie gesagt, die Emanation viel rascher (in 60 Sekunden), aber die von ihr erzeugte mitgeteilte Aktivität hat ein viel zäheres Leben als die mitgeteilte Radiumaktivität, sie braucht nämlich $11\,^{1}/_{2}$ Stunden, um auf die Hälfte ihres Betrages herabzusinken. Bei der Bildung der induzierten Aktivität aus der Emanation entstehen sowohl α-, als β-, als γ-Strahlen, während bei der Bildung der Emanation aus Radium sich nur α-Strahlen bilden.

So zeigt sich also, daß ausgehend vom Radiumatom sich hintereinander durch fortschreitende Zersetzung neue Stoffe bilden, erst die Emanation, dann die mitgeteilte Aktivität.

Hat man ein Quantum Radiumsalz, so sind zugleich mit dem Radium auch seine Zerfallsprodukte, die Emanation und die mitgeteilte Aktivität in ihm vorhanden. Es werden bei dieser Umwandlung fortwährend Strahlen ausgesendet, und zwar hauptsächlich α-Strahlen. Die abgeschleuderten

α-Teilchen fliegen zum Teil von dem Präparat fort in die Luft, zum Teil aber, wenn sie von Atomen abgeschleudert werden, die im Innern des Präparats sich befinden, stoßen sie auf die anderen Teile des Präparats und verlieren so ihre Bewegung, indem sie ihre Energie den Molekülen mitteilen. Darauf, auf dieser Stoßwirkung der abgeschleuderten α-Teile, beruht im wesentlichen, wie Rutherford gezeigt hat, die höhere Temperatur, welche jedes Radiumpräparat gegenüber seiner Umgebung zeigt und infolgedessen die Wärmemenge, welche es ausstrahlt. Diese ist also direkt eine Umwandlung der Energie, welche bei dem Zerfall der Atome frei wird.

Die mitgeteilte Aktivität ist, wie weitere Forschungen ergeben haben, kein einheitlicher Körper. Ihre Abklingungskonstante hat nicht einen so fest bestimmten Wert, wie die der Emanation, sondern der Wert der Abklingungskonstante ist verschieden, je nachdem die mitgeteilte Aktivität längere oder kürzere Zeit bestanden hat. Es weist das im Sinne der Theorie des Atomzerfalls darauf hin, daß dasjenige, was wir im ganzen mitgeteilte Aktivität nennen, in Wirklichkeit aus einem Gemisch mehrerer Körper besteht, die auseinander hervorgehen, die aber zum Teil gleichzeitig vorhanden sind und zwar je nach der Dauer der Umwandlung in wechselnden Mengen. So hat eine eingehende Untersuchung gezeigt, daß in der mitgeteilten Aktivität des Radiums mindestens sechs Körper vorhanden sind, die auseinander hervorgehen und die sehr verschiedene Abklingungskonstanten haben. Man bezeichnet zweckmäßig

Fig. 335.

Radium Eman. Rad.A. Rad.B. Rad.C. Rad.D. Rad.E. Rad.F.

diese aus der Emanation hervorgehenden Körper dadurch, daß man zu dem Ausgangsstoff der Reihe nach die Buchstaben A, B, C . . . u. s. w. hinzusetzt. In der mitgeteilten Aktivität des Radiums sind also zunächst folgende Stoffe nachgewiesen, deren Abklingungskonstanten zugleich hingeschrieben seien:

Radium	A:	Abklingungskonstante	3	Minuten,
„	B:	„	21	„
„	C:	„	28	„
„	D:	„	ca. 40	Jahre,
„	E:	„	6	Tage,
„	F:	„	143	„ .

Diese Umwandlungen aus einem Stoff in den folgenden gehen aber immer (oder fast immer) mit der Aussendung von Strahlen Hand in Hand, und zwar werden meistens α-Strahlen, bei manchen Umwandlungen auch β- und γ-Strahlen ausgesendet. Die Umwandlung des Radiums in die aufeinanderfolgenden Substanzen zugleich mit der Aussendung von α-Teilchen und von β- und γ-Strahlen ist übersichtlich durch Fig. 335 dargestellt.

Das Radiumatom verwandelt sich unter Aussendung eines α-Teilchens in die Emanation, diese durch Aussendung eines α-Teilchens in Radium A, Radium A geht unter Aussendung eines α-Teilchens in Radium B über. Radium B aber sendet keine Strahlen aus, sondern verwandelt sich spontan in Radium C. Dieses aber sendet nun sowohl negative Elektronen (β-Strahlen), wie auch α-Strahlen und γ-Strahlen aus, es bildet sich unter Verlust eines α-Teilchens und eines negativen Elektrons in Radium D um, welches nun ein sehr beständiger Körper ist, der aber keine Strahlen aussendet. Dieser aber verwandelt sich langsam in eine neue Substanz Radium E, bei der man nur die Aussendung von negativen Elektronen und γ-Strahlen, nicht von α-Teilchen beobachtet hat. Und aus dem Radium E bildet sich endlich Radium F, das nur α-Teilchen aussendet.

Was man im großen und ganzen mitgeteilte Aktivität nennt, besteht also aus den rasch zerfallenden Stoffen A B C und den langsam zerfallenden D E F.

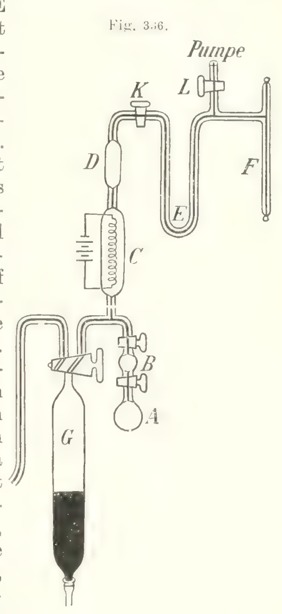
Von besonders großem Interesse ist nun, daß das Radium F in allen seinen Eigenschaften identisch ist mit dem Polonium und daß dieses wieder identisch ist mit dem sogenannten Radiotellur. Das Polonium ist also kein ursprünglicher aktiver Körper, sondern ist selbst eine Umwandlung des Radiums. Ebenso ist das sehr beständige Radium D, welches 40 Jahre braucht, um auf die Hälfte seines Betrags durch Umwandlungen herabzusinken, identisch mit dem Radioblei, welches man zeitweise für einen selbständigen aktiven Körper hielt.

Welches ist nun der Schluß dieser fortschreitenden Umwandlung, was wird schließlich aus den Teilen, die im Radiumatom enthalten sind?

Ein höchst überraschendes Experiment, das von dem hervorragenden englischen Forscher Ramsay herrührt, schien darauf eine ebenso bestimmte wie unerwartete Antwort zu geben. Ramsay ist bekanntlich der Entdecker der neuen Elemente in der Atmosphäre, des Argon, Xenon, Krypton, Neon und des Helium, des sonderbaren Elementes, das man zuerst in dem Spektrum der Sonnenkorona durch eine auffallende gelbe Linie im Spektrum gefunden hatte, bis es sich nach langer Zeit auch bei uns als gasförmiges Element aus verschiedenen Mineralien entwickeln ließ. Diese Gase alle haben die gemeinsame Eigenschaft, daß sie in gar keiner Weise bisher sich fähig gezeigt haben, chemische Verbindungen mit irgendwelchen Stoffen einzugehen. Sie werden von keinem chemischen Reagenzmittel angegriffen. Man bezeichnet diese Gruppe von Gasen daher als inerte (träge) Elemente. Ramsay hat nun die Emanation des Radiums in eine evakuierte Glasröhre eintreten lassen, und indem er einen elektrischen Strom durch die Röhre sandte, wurde der Inhalt der Röhre leuchtend und ergab, durch ein Prisma beobachtet, ein kompliziertes Spektrum. In diesem Spektrum war aber sicher die gelbe Linie, welche für das Helium speziell charakteristisch ist, die Heliumlinie nicht enthalten. Als jedoch die evakuierte Röhre 3 Tage stehen geblieben war und danach wieder untersucht wurde, zeigte sich die gelbe Heliumlinie und es zeigten sich am folgenden Tage auch alle anderen Linien des Heliums, außerdem noch einige unbekannte Linien. Der Versuch wurde mit demselben Resultat oft wiederholt und es wurde stets konstatiert, daß, während die Röhre

zuerst heliumfrei war, nach einigen Tagen Helium erschien. Die Art und Weise, wie dieses Experiment angestellt wurde, geht aus Fig. 336 hervor. In einer kleinen Flasche A befinden sich 20 bis 30 mg Radiumbromid. In der Kugel B, die zunächst durch je einen Hahn von A und von oben abgeschlossen ist, befindet sich luftfreies reines Wasser. Die weiteren Teile des Apparates enthalten bei C eine oxydierte Kupferspirale, die durch einen elektrischen Strom zum Glühen gebracht werden kann, und bei D ein Gefäß, welches Phosphorpentoxyd zum Absorbieren alles Wasserdampfs enthält. Bei E ist ein **U**-Rohr, welches durch flüssige Luft abgekühlt werden kann, bei F die Spektralröhre, die ungefähr in $^1/_4$ natürlicher Größe gezeichnet ist, bei L ist eine Luftpumpe angeschlossen und von G aus kann man Quecksilber in den ganzen Apparat aufsteigen lassen. Nach dem alles vorbereitet ist, die Luft aus dem Apparat entfernt ist, wird das Wasser von B nach A gebracht, das Radiumbromid löst sich in Wasser auf und entwickelt die Emanation. Zugleich entwickelt es okkludierte Gase, Wasserstoff und Sauerstoff, die von der glühenden Kupferspirale in C absorbiert werden, ebenso wie Wasserdämpfe in D festgehalten werden. Nun läßt man von G aus Quecksilber aufsteigen und treibt dadurch die Emanation und alle etwaigen sonstigen Gase in die durch flüssige Luft gekühlte Röhre E, wo sich die Emanation verdichtet, während etwa schon vorhandenes Helium nicht verdichtet wird und durch die Pumpe bei L fortgeschafft wird. (Helium ist dasjenige Gas, welches von allen Gasen die allertiefste Temperatur erfordert, um flüssig zu werden, und welches bei der Temperatur der flüssigen Luft [— 190°] noch durchaus gasförmig bleibt.) Läßt man nun die Emanation wieder frei werden, so findet man in der Röhre F, wenn man sie durch einen Induktionsapparat zum Leuchten bringt, nach 3 bis 5 Tagen die unzweifelhafte Anwesenheit von Helium. Der notwendige Schluß daraus ist der, daß sich Helium aus der Radiumemanation gebildet hat.

Fig. 336.



Aus diesem überraschenden Experiment glaubte man allgemein zunächst den Schluß ziehen zu müssen, daß das entstandene Helium das Endprodukt der vielfachen Umwandlungen des Radiums sei, und man glaubte damit unzweifelhaft ein chemisches Element, das Radium, in ein anderes chemisches Element, das Helium verwandelt zu haben. Dieses Resultat schien deswegen von so ungeheurer Wichtigkeit, weil es nachträglich das realisiert zu haben schien, was Jahrhunderte hindurch als das Ziel aller chemischen (alchimistischen) Forschung galt, die Umwandlung eines

chemischen Elementes in ein anderes, was aber dann von der wissenschaftlichen Chemie als eine Utopie angesehen und aus dem Kreise ernsthafter wissenschaftlicher Bestrebungen ausgeschlossen wurde. Durch spontane Zersetzung schien eine Substanz, die man Grund hat für ein Element zu halten, wie das Radium, in ein anderes unzweifelhaftes Element, das Helium, verwandelt worden zu sein, eines der schwersten Elemente in ein sehr leichtes.

Indes gegen diese Schlußfolgerung machten sich bald nüchterne Bedenken geltend. Es ist höchst unwahrscheinlich, oder sogar unmöglich, daß das gebildete Helium das Endprodukt der Umwandlung der Radiumemanation sei. Denn diese Umwandlung geschieht über Radium A, B, C, D hinweg nach F, und das Radium D ist, wie wir jetzt wissen, ein sehr langlebiger Körper, der 40 Jahre braucht, um auf die Hälfte zu zerfallen. Es können sich daher in wenigen Tagen nur ganz minimale Mengen Helium gebildet haben, keinesfalls kann die Emanation sich ganz oder zum größten Teil in Helium umgewandelt haben. Wenn aber das nicht der Fall ist, so bleibt zur Erklärung der Bildung des Heliums, die unzweifelhaft feststeht, bloß die eine Annahme übrig, daß die von der Emanation und ihren Umwandlungsprodukten abgeschleuderten α-Teilchen selbst Heliumatome sind. In der Tat hat sich, wie wir oben S. 341 angeführt haben, die Masse eines α-Teilchens gleich der eines Heliumatoms ergeben. Es scheint danach, daß das Heliumion ein Bestandteil des Radiums und ebenso der anderen radioaktiven Körper, die α-Teilchen aussenden, sei. Überall wo in der Natur Radium vorhanden ist, muß nach dieser Auffassung auch Helium vorhanden sein, wenn es keinen Ausweg hat, sich in die Atmosphäre zu zerstreuen. Denn spontan entsteht aus dem Radium und seiner Emanation dauernd Helium. Da Radium immer mit Uran und Thorium vorkommt, so versteht man nachträglich die Verwunderung von Ramsay, der das Helium zuerst aus irdischen Substanzen abgeschieden hatte, darüber, daß dieses nur in Mineralien vorkommt, die auch Uran und Thor enthalten. Darf man umgekehrt aus dem Vorhandensein von Helium auf das von Radium schließen, so muß Radium auch in der Sonne vorhanden sein, denn das Helium ist ein Element, welches zuerst auf der Sonne durch seine Spektrallinie gefunden war (der Name Helium kommt von ἥλιος, helios, Sonne), bevor man es auf Erden entdeckt hatte.

Wenn aber Helium nicht das Endprodukt der Umwandlung des Radiums ist, was wird dann doch schließlich aus dem Radium? Man kann die Umwandlungen verfolgen bis zu Radium F, dann aber läßt sich keine weitere Umwandlung mehr durch die elektrischen Methoden nachweisen. Sichtbar ist ja überhaupt nichts von den aufeinanderfolgenden Stoffen. Nun ersieht man aus der Zeichnung S. 347, daß wenn das Radium sich bis Radium F verwandelt, daß dann im ganzen, inklusive der Strahlung von Radium F, 5mal α-Teilchen ausgesendet werden. Wenn man annimmt, was wahrscheinlich ist, daß bei der Umwandlung je eines Atoms immer auch ein und nur ein α-Teilchen ausgesendet wird, so muß der Körper, der aus Radium F entsteht, 5 α-Teilchen weniger im Atom besitzen, als das Radium selbst. Da nun das Atomgewicht des Radiums 225 ist, das des Heliums 4 ist, so muß dieses Endprodukt das Atomgewicht 225 — (5 $\times$ 4)

= 205 haben. Das Atomgewicht des Bleis ist aber 205,3, so daß es möglich ist, daß dieses der Schluß der Umwandlung ist, daß das Radium sich schließlich in Blei verwandelt.

Eine schwierige Frage, welche dieser ganzen Theorie des Atomzerfalls entgegengehalten werden kann und muß, ist aber die, wie es möglich ist, daß überhaupt noch Radium auf der Erde vorhanden ist, da dasselbe sich doch seit Jahrtausenden fortwährend von selbst zerlegt und unablässig die Emanation und Helium entwickelt, und außerdem auch β-Teilchen ausstrahlt. Da seit Beginn der Erde diese Umsetzung stattfindet, so sieht man nicht ein, wieso überhaupt noch Radium und ebenso Thorium und Uran auf Erden vorhanden sind. Die einzige Möglichkeit, diese Frage zu beantworten, scheint darin zu liegen, daß man annimmt, daß sich das Radium und die anderen Elemente auch wieder bilden können. Und das ist tatsächlich die Folgerung, zu der die Begründer und Anhänger dieser Theorie gelangt sind und die zum Teil schon bewiesen ist. Man nimmt an, daß diese schweren Elemente Uran, Radium, Thorium selbst die Produkte des Zerfalls anderer Elemente sind, daß insbesondere das Radium selbst ein Zerfallsprodukt des Urans ist, mit dem verbunden es in der Tat immer vorkommt. Da diese Umwandlung sehr langsam geschieht, so ist es möglich, daß mit großen Quantitäten Uran doch noch kleine Quantitäten Radium gleichzeitig mit dem Endprodukt ihrer Entwicklung, dem Helium, vorkommen.

Obwohl das Radium nur in verhältnismäßig geringen Mengen, hauptsächlich aus der Pechblende, abgeschieden wurde, so ist doch der gesamte Gehalt der Erde an Radium kein geringer. Es hat sich gezeigt, daß der Fangoschlamm nicht unbedeutend radiumhaltig ist. Im Erdboden selbst, in der Ackererde, ist immer Radium enthalten, das seine Emanation ausgibt. Fast alle heißen Quellen enthalten Radiumemanation, und es scheint wohl mit Recht, daß eine Reihe von Heilwirkungen dieser Quellen gerade auf diesem Emanationsgehalt beruht. Aus dem Erdboden dringt die Emanation auch in die Luft über und macht dieselbe, wenn auch nur in geringem Maße, durch Ionisation leitend.

Die Forschungen über Radioaktivität haben bereits eine ganz neue Disziplin, die weder Physik noch Chemie ist, sondern eben die Chemie des Atomzerfalls ist, hervorgebracht. Weitere Experimente werden im Laufe der Zeit auch hier immer weitere Klärung und vielleicht sehr überraschende neue Tatsachen bringen. Nur auf eine Folgerung aus der Radiumforschung in rein elektrischer Beziehung sei hingewiesen. Da die Becquerelstrahlen die Luft ionisieren, so läßt sich in einem Raume, in dem Radium längere Zeit vorhanden ist, eine elektrische Ladung gar nicht auf den Körpern halten, sondern sie wird sehr rasch zur Erde abgeleitet. Würde das Radium in der Natur in großen Mengen konzentriert vorkommen, was es aber eben nicht tut, so wären die Eigenschaften der ruhenden Elektrizität gar nicht entdeckt worden, weil man nie einen Körper hätte geladen halten können. Wir können daraus ersehen, von welchen Zufällen unsere Einsichten in die Natur doch abhängen, und können daraus die halb betrübliche, halb hoffnungsvolle Vermutung entnehmen, daß das, was wir von der Natur und speziell der Elektrizität nicht wissen, noch viel umfangreicher ist als dasjenige, was wir bereits kennen.

14. Kapitel.

Elektrizität und Licht.

Viele Jahre, ehe die Wissenschaft der Elektrizität durch die Entdeckungen von Hertz so weit war, daß sie den engen Zusammenhang zwischen der Elektrizität und dem Äther, dem Träger der Erscheinungen des Lichtes, erkannte, viele Jahre, ja sogar Jahrzehnte vorher hatte Faraday einen solchen Zusammenhang vermutet und durch Experimente zu beweisen gesucht. Wenn unter den vielen großartigen Entdeckungen von Faraday einer der Preis zu erteilen wäre in Bezug auf die Genialität der physikalischen Intuition, so ist es gerade die Entdeckung, von der wir in diesem Kapitel sprechen wollen, welche diesen gesuchten Zusammenhang zwischen Elektrizität und Licht offenbarte. Nicht als ob diese Entdeckung bisher von großer praktischer Bedeutung wäre. Die Induktionserscheinungen, die elektrolytischen Gesetze, beide ebenfalls große Taten Faradays, haben einen unendlich höheren praktischen Wert. Aber aus größerer Tiefe, aus unbekannterer Region kam keine Entdeckung, und in rein wissenschaftlicher Beziehung war keine Entdeckung von größerer Wichtigkeit als die Faradaysche der magnetischen Drehung der Polarisationsebene des Lichtes. Sie war so tief, daß sie jahrzehntelang nur als eine wissenschaftlich merkwürdige Tatsache galt, aus der man keine weiteren Schlüsse ziehen konnte. Man mußte sich nur verwundern, wie jemand nicht zufällig, sondern in bewußter Weise auf dieses Experiment kam. Faraday aber hatte stets die Anschauung, daß ein Zusammenhang zwischen Lichterscheinungen und elektrischen Erscheinungen existieren müsse, da er beide als Vorgänge im Äther ansah, und so handelte es sich für ihn nur darum, diesen Zusammenhang, über dessen Art man von vornherein nichts aussagen konnte, zu suchen und zu finden. Er probierte in der Tat zunächst, ob nicht während der Elektrolyse, wo ja die Ionen sich bewegen, ein Lichtstrahl, der durch den Elektrolyten gesendet wird, beeinflußt wird. Er ließ ihn in der Richtung des Stromes oder in der entgegengesetzten Richtung oder senkrecht zur Stromrichtung durch die Flüssigkeit gehen, ohne daß sich jemals, bei noch so feinen Anordnungen, irgend eine Wirkung zeigte. Aber seine Überzeugung von einem Zusammenhang war unerschütterlich, und so nahm er 1845 diese Versuche wieder auf, nur daß er diesmal statt der elektrolytischen Wirkungen des Stromes vielmehr die magnetischen Wirkungen desselben ins Auge faßte, und diesmal mit glänzendem Erfolg.

Um aber diesen Zusammenhang zu verstehen, müssen wir eine Tatsache besprechen, die aus der Lehre vom Licht bekannt ist, nämlich die Tatsache, daß man dem gewöhnlichen Licht durch einfache Hilfsmittel eine besondere Modifikation geben kann, die es für gewöhnlich nicht hat, eine Modifikation, mit der das Licht dann einfachere Verhältnisse als gewöhnlich zeigt.

Dieses Hilfsmittel besteht einfach in einem Stück eines wasserhellen Kristalls, des Kalkspats, wie Fig. 337, der in einer bestimmten, uns nicht näher interessierenden Weise geschnitten ist. Ein solcher Kalkspat wird ein Nicolsches Prisma oder kurz ein Nicol genannt. Man bringt ihn in eine Metallfassung hinein, so daß man einen Lichtstrahl durch ihn der Länge nach hindurchsenden kann. Der Querschnitt des Kalkspats, den man an den Enden der Fassung sieht, hat die Form, wie sie aus Fig. 338 zu erkennen ist, ein schiefwinkeliges Viereck, dessen eine Diagonale erheblich größer ist als die andere. Die Ebene, die durch die längere Diagonale und den durch den Nicol gesendeten Lichtstrahl gelegt ist, nennt man die Polarisationsebene des Nicols und man markiert diese Ebene an der Fassung des Nicols häufig durch einen Pfeil oder eine Fahne. In Fig. 339 ist ein Nicol N in einer Fassung auf einem Gestell angebracht, welches außerdem noch eine drehbare, mit Löchern verschiedener Größe versehene Scheibe trägt, durch die man Lichtbündel von größerer oder kleinerer Dicke abgrenzen und durch den Nicol gehen lassen kann. Die an der Fassung des Nicols befestigte Papierfahne gibt die Richtung der Polarisationsebene an, sie hat die Richtung der längeren Diagonale von N. Diese Fahne wollen wir kurz als Pfeil bezeichnen. Läßt man einen gewöhnlichen Lichtstrahl, den man auch einen natürlichen Lichtstrahl nennt, durch einen solchen Nicol hindurchgehen, so ist das aus ihm heraustretende Licht modifiziert und man nennt es dann polarisiertes Licht. Daß es modifiziert ist und worin diese Modifikation besteht, erkennt man sofort, wenn man einen zweiten, ebenso beschaffenen Nicol anwendet. Das Licht, das von dem ersten Nicol kommt, geht nämlich durch den zweiten Nicol nicht hindurch, wenn dessen Pfeil senkrecht zum ersten steht. Es geht in gewöhnlicher Weise hindurch, wenn die Pfeile parallel sind, und es geht nur geschwächt hindurch, wenn die Pfeile irgendwie schief zueinander stehen. Diese sonderbare Eigenschaft, die man am gewöhnlichen Licht nie beobachtet, sondern nur am polarisierten, beruht darauf, daß in einem Nicol die Schwingungen des Lichtes überall und fortwährend nur nach derselben Richtung geschehen, niemals wechseln, und zwar hat man ermitteln können, daß sie immer senkrecht zu der Polarisationsebene stattfinden, also in der

Fig. 337.

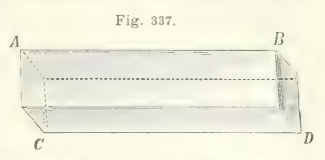


Fig. 338.

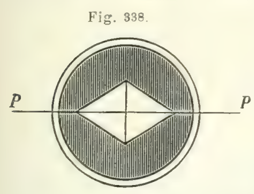
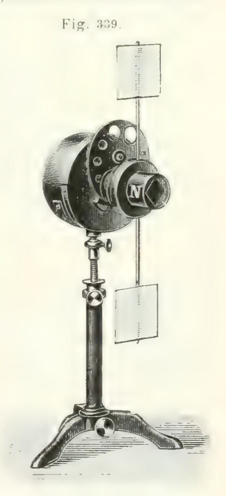


Fig. 339.



Richtung der kurzen Diagonale des Nicols. Steht also z. B. ein Nicol mit seiner Polarisationsebene horizontal und geht durch ihn ein Lichtstrahl hindurch, so geschehen in dem Lichtstrahl, innerhalb des Nicols und nach dem Austreten, die Schwingungen alle vertikal, auf und ab. Steht der zweite Nicol so, daß seine Polarisationsebene senkrecht zum ersten, also vertikal liegt, so können in ihm nur horizontale Schwingungen verlaufen; diese sind aber in dem ankommenden Licht nicht vorhanden, folglich kann dieses nicht durch den zweiten Nicol hindurchgehen. Ist dagegen in dem zweiten Nicol die Polarisationsebene auch horizontal, so geht das auffallende Licht glatt hindurch, und wenn er schief steht, so geht bloß eine Komponente des auffallenden Lichtes hindurch, es erscheint also geschwächt.

Wenn man daher durch zwei Nicols hindurch auf einen hellen Körper, eine Flamme, ein weißes Papier oder dergleichen hinsieht, so sieht man den Körper, wenn die beiden Polarisationsebenen der Nicols gleiche Richtung haben; man sieht ihn nicht, der Körper erscheint dunkel, wenn die beiden Polarisationsebenen senkrecht aufeinander stehen.

Man drückt diese Tatsache kurz so aus:

Durch parallele Nicols geht Licht hindurch, durch gekreuzte Nicols nicht.

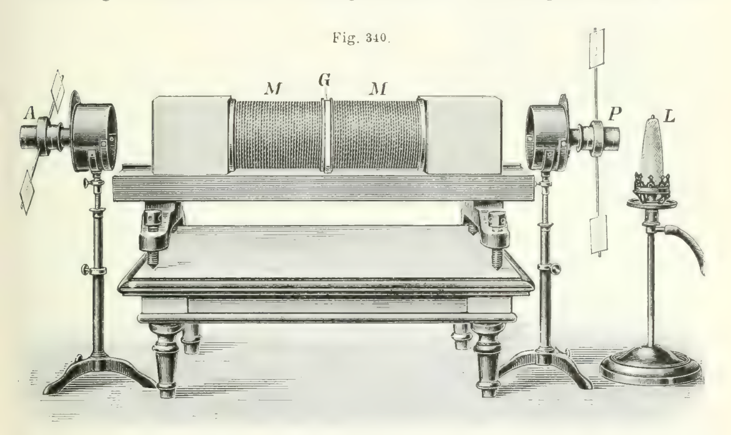
Man bezeichnet auch denjenigen von zwei hintereinander gestellten Nicols, durch den das Licht zuerst hindurchgeht, als Polarisator, weil er das Licht polarisiert, den zweiten als Analysator, weil er das polarisierte Licht erkennen läßt. Denn dreht man den zweiten Nicol aus der parallelen Lage in die gekreuzte, so wird das durchgelassene Licht allmählich schwächer bis zum Verschwinden, und umgekehrt ist eine solche Änderung der Stärke des Lichtes beim Drehen eines Nicols das Zeichen dafür, daß das ankommende Licht polarisiert war.

Gerade an solchem polarisierten Licht hat nun Faraday seine wunderbare Entdeckung gemacht, und deswegen mußte die Polarisation des Lichtes hier kurz erörtert werden. Die Frage, die er sich stellte, war, ob das Licht in der Nähe eines Magneten irgend eine Beeinflussung erfahre, und sein Experiment lehrte, daß zwar nicht das natürliche Licht, wohl aber das polarisierte eine solche Beeinflussung wirklich erfuhr. Wenn man zwei entgegengesetzte Magnetpole einander nahe gegenüberstellt, so daß zwischen ihnen ein starkes magnetisches Feld entsteht, so ist in diesem Feld offenbar die Richtung der Kraftlinien, die in der Verbindungslinie des Nordpols und Südpols laufen, besonders ausgezeichnet. Die Entdeckung von Faraday zeigte, daß eine Beeinflussung von polarisiertem Licht durch den Magneten stattfindet, wenn dieses Licht in der Richtung der Kraftlinien sich fortpflanzt.

Um einen Lichtstrahl bequem in der Richtung der Kraftlinien durch ein magnetisches Feld zu senden, wendet man vorteilhaft das Mittel an, daß man die Pole des Magneten durchbohrt, so daß das Licht durch die Bohrung geschickt werden kann. Sehr bequem ist daher der Elektromagnet, den wir auf S. 164, Fig. 147 abgebildet haben. In Fig. 340 sieht man einen solchen Elektromagneten, dessen beide Pole MM einander nahe gerückt sind, um ein starkes Feld zwischen sich entstehen zu lassen, und die durch die ganze Länge eine Bohrung besitzen. Wir setzen

zwischen die Pole ein Stück Glas G mit ebenen Seitenwänden und bringen auf beide Seiten des Elektromagneten je ein Nicolsches Prisma, vorn einen Polarisator P, hinten einen Analysator A. Wenn wir nun den Polarisator etwa vertikal stellen und den Analysator horizontal, also gekreuzt, und Licht von einem Glühstrumpf L durch den vorderen Nicol P, das Glas G und den hinteren Nicol A senden, so wissen wir ja, daß kein Licht durch den Analysator hindurchgeht, weil er eben gekreuzt steht. Sehen wir durch den Analysator nach der Lampe hin, so haben wir ein dunkles Gesichtsfeld. Wenn wir nun aber den Magneten erregen, indem wir seinen Strom schließen, ohne sonst etwas zu ändern, so finden wir zu unserer Überraschung, daß das Feld sich aufhellt, daß wir jetzt die Lampe L sehen. Das war die Entdeckung von Faraday, und Faraday war gewiß ebenso überrascht über diese Erscheinung, obwohl er etwas Derartiges suchte. Also die gekreuzten Nicols

Fig. 340.



bringen jetzt nicht mehr Dunkelheit hervor. Um wieder Dunkelheit zu erzeugen, müssen wir den Nicol A aus der gekreuzten Stellung herausdrehen, bei diesem Versuch etwa um 15^0, wie es die Stellung von A in der Figur zeigt. Dann erhalten wir wieder Dunkelheit. Da unser Analysator dasjenige Licht nicht hindurchläßt, dessen Polarisationsebene senkrecht zu der seinigen ist, so sieht man, daß das an ihn gelangende Licht, nachdem es das Glas durchsetzt hat, nicht mehr die vertikale Polarisationsebene behalten haben kann, die durch den ersten Nicol erzeugt worden ist, sondern daß seine Polarisationsebene in dem Glas um etwa 15^0 gedreht worden sein muß. Und das ist daher der kurze Ausdruck der Erfahrungstatsache, ohne jede Hypothese: *In dem magnetischen Feld wird die Polarisationsebene des Lichtes, welches sich in der Richtung der magnetischen Kraftlinien fortpflanzt, gedreht.* Wie groß der Drehungswinkel ist, das hängt erstens von der Stärke des Magnet-

feldes und zweitens von der Natur und der Dicke des Körpers ab, der im magnetischen Feld sich befindet; Glas, Wasser, Petroleum, Schwefelkohlenstoff bringen jedes pro Zentimeter Dicke im magnetischen Feld eine Drehung von bestimmter Größe hervor. Je stärker das Magnetfeld ist, um so größer ist unter sonst gleichen Umständen die Drehung.

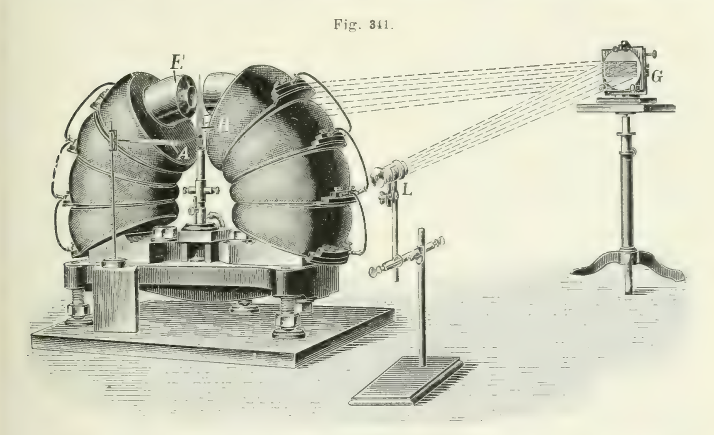
Was den Sinn der Drehung betrifft, nämlich ob die Drehung im Sinne des Uhrzeigers oder entgegengesetzt geschieht, so hat schon Faraday das sehr einfache und schöne Gesetz dafür gefunden. Denkt man sich die magnetischen Kraftlinien von Ampèreschen Molekularströmen umgeben (S. 207), so ist die Richtung der Drehung immer gleich der Richtung der Molekularströme (mit Ausnahme einiger besonderer Substanzen). Es kommt also gar nicht darauf an, ob der Lichtstrahl vom Nordpol zum Südpol sich fortpflanzt, oder umgekehrt vom Südpol zum Nordpol, der Sinn der Drehung ist beide Male derselbe. Daraus folgt, daß wenn man es so einrichtet, daß der Lichtstrahl, nachdem er das Glas durchlaufen hat, reflektiert wird und dann das Glas im umgekehrten Sinne durchläuft, daß dann die Drehung im ganzen verdoppelt wird.

Diese prachtvolle Entdeckung von Faraday zeigte also unzweideutig, daß eine Beeinflussung des Lichtes durch magnetische Kräfte tatsächlich stattfindet. Immerhin aber geht diese Beeinflussung hier unter scheinbar sehr komplizierten Umständen in komplizierter Weise vor sich. Man muß erstens polarisiertes Licht haben, zweitens dieses in Richtung der Kraftlinien durch das Magnetfeld senden und findet dann, daß das Licht an sich nicht beeinflußt wird, sondern nur seine Polarisationsebene gedreht wird. Aber alle Versuche, die man machte, eine weitere, vielleicht einfachere Wechselwirkung zwischen Licht und Magnetismus oder Elektrizität zu finden, blieben fast fünfzig Jahre lang ohne Erfolg. Die Faradaysche Erscheinung war und blieb die einzige. Man konnte sie mit Recht so auffassen, daß man sagte, in einem Magnetfeld geht jedenfalls etwas vor, was die Natur einer Drehung, nicht die einer Verschiebung hat. Aber man hätte dann auch erwarten dürfen, daß Licht, welches senkrecht zu den Kraftlinien durch ein Magnetfeld geht, irgendwie beeinflußt wird. Doch alle, auf die verschiedenfachsten und zum Teil sehr genialen Weisen unternommenen Versuche, dies zu finden, gaben stets nur negative Resultate.

Erst vor wenigen Jahren gelang es einem Holländer, Professor Zeeman, eine weitere, hochinteressante Wirkung des Magnetismus auf das Licht zu finden. Schon Faraday hatte versucht, ob nicht bei Flammen, die ja selbst das Licht aussenden, ob nicht bei diesen die Strahlung durch den Magnetismus beeinflußt wird. Es wäre ja offenbar möglich, daß die Schwingungen der Moleküle einer Flamme, durch die das Licht erst erzeugt wird, durch den Magnetismus modifiziert würden. Faraday hatte bei diesen Versuchen keinen Erfolg, aber Zeeman, der mit größeren und feineren Hilfsmitteln arbeiten konnte, fand in dieser Richtung tatsächlich eine neue Erscheinung, die man das Zeemansche Phänomen nennt. Man kann bekanntlich Flammen herstellen, welche nur Licht von einer einzigen bestimmten Farbe aussenden, sogenannte monochromatische Flammen. Bringt man in eine gewöhnliche nichtleuchtende Gasflamme etwas Natriumsalz (Kochsalz), so leuchtet die

Flamme gelb und sendet Licht von einer ganz bestimmten Schwingungsdauer und Wellenlänge aus. Ebenso, wenn man ein Lithiumsalz in die Flamme bringt, erhält man ein rotes Licht von ganz bestimmter Wellenlänge und Farbe, bei Thalliumsalz ein grünes u. s. f. So kann man einfach Flammen herstellen, die Licht von einer oder von einigen wenigen verschiedenen Farben aussenden. Wenn man das Licht einer solchen Flamme mittels einer Linse durch ein Prisma sendet, so erhält man eine oder mehrere ganz scharfe farbige Linien an bestimmten Stellen. Besser benutzt man statt eines Prismas ein sogenanntes Beugungsgitter, auf welches man das Licht der Flamme durch eine Linse wirft. Man erhält dann im reflektierten Licht sehr scharfe Linien an bestimmten Stellen, die durch die Schwingungsdauer des Lichtes bestimmt sind. Ein Beugungsgitter anzuwenden hat den Vorzug vor der Benutzung eines Prismas, daß man dadurch nahe bei einander stehende Linien noch

Fig. 341.



deutlich trennen kann. Zum Beispiel zeigt es sich, daß die gelbe Natriumflamme nicht Licht von einer einzigen bestimmten Schwingungsdauer aussendet, sondern von zwei wenig verschiedenen Schwingungsdauern. Man sieht daher auch, wenn man auf ein solches Beugungsgitter das Licht einer Natriumflamme wirft und in passender Richtung durch ein Fernrohr oder eine Lupe das Gitter beobachtet, zwei nahe bei einander befindliche gelbe Linien, die man die D-Linien nennt. Soweit ist alles aus der Optik bekannt und bietet nichts Neues. Nun aber brachte Zeeman die Natriumflamme, die das Licht aussendet, zwischen die Pole eines starken Elektromagneten, und hierbei sah er, daß jede einzelne Linie sich in drei Linien zerteilt, wenn das Licht, das senkrecht zu den Kraftlinien austritt, beobachtet wird. Um die Anordnung des Versuchs zu zeigen, ist derselbe in Fig. 341, so gut es geht, dargestellt. Man sieht den Halbringelektromagneten mit abgerundeten Polen, den wir schon auf

S. 164 beschrieben haben. Zwischen den Polen befindet sich ein gewöhnlicher Bunsenbrenner B. In die Flamme wird durch einen Platindraht A eine Perle aus Natriumsalz hineingehalten, wodurch gelbes Natriumlicht entsteht. Das Licht geht durch einen engen Spalt hindurch und wird senkrecht zu den Kraftlinien des Magnets durch eine Linse auf ein (Rowlandsches) Beugungsgitter G geworfen. Durch ein Fernrohr L beobachtet man das Gitter in bestimmter Richtung und sieht dann die beiden D-Linien der Natriumflamme. Sobald man aber den Elektromagneten erregt, findet man, daß jede der beiden Natriumlinien in drei nahe bei einander befindliche Linien zerfällt. Es bildet sich aus jeder einzelnen Linie ein sogenanntes Triplet. Das ist eines der neuen Phänomene, die Zeeman entdeckt hat. Wie man sieht, handelt es sich um Licht, welches in dem Magnetfeld entsteht und welches senkrecht zu den Kraftlinien des Magneten nach außen geht. Macht man denselben Versuch, indem man dasjenige Licht beobachtet, welches von der Flamme in der Richtung der Kraftlinien nach außen geht (zu dem Zwecke sind Durchbohrungen in den Eisenkernen des Halbringelektromagnets angebracht), so findet man, daß jede Linie verdoppelt wird; aus einer Linie entsteht ein sogenanntes Doublet. Das ist das zweite, mit dem ersten zusammenhängende Phänomen, das von Zeeman gefunden wurde.

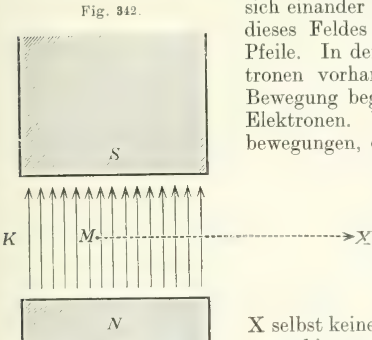
Um diese beiden Erscheinungen zusammenzufassen, kann man sagen, durch den Magnetismus wird die Schwingungsdauer der leuchtenden Teile in der Flamme beeinflußt. Denn jeder bestimmten Linie, die man von dem Gitter erhält, entspricht eine bestimmte Schwingungsdauer. Wird also eine Linie in drei gespalten, die eng bei einander, aber doch getrennt sind, so heißt das, es ist durch den Magnetismus außer dem ursprünglichen Licht noch Licht von etwas geänderter Schwingungsdauer entstanden, und zwar einerseits solches, welches etwas größere, andererseits solches, welches etwas kleinere Schwingungsdauer hat als das ursprüngliche.

Eine Erklärung dieser höchst merkwürdigen Erscheinung hat Zeeman auf Grund der Elektronentheorie gegeben. Das eigentlich Leuchtende in einer Flamme sind, wie er annimmt, nicht schwingende Moleküle, wie man früher meinte, sondern schwingende Elektronen. Denn da der Äther elektrische Wellen fortpflanzt, so muß er auch durch elektrische Bewegungen angeregt werden, und solche Bewegungen sind eben die der Elektronen, die in der Flamme vielleicht frei, vielleicht mit Materie verbunden (als Ionen) vorhanden sind. Wenn nun eine solche Flamme mit nach allen Richtungen schwingenden Elektronen in ein magnetisches Feld gebracht wird, so beeinflußt dieses Feld die Bewegung jedes einzelnen Elektrons in der Weise, daß es ihm noch einen Bewegungsantrieb senkrecht zu den Kraftlinien und senkrecht zu seiner schon vorhandenen Bewegung erteilt. Wir wissen dies aus der Linken-Hand-Regel, die auf S. 182 angeführt war. Daraus folgt, daß die Geschwindigkeiten der einzelnen Teilchen in der Richtung senkrecht zu den Kraftlinien zum Teil vergrößert, zum Teil verkleinert werden müssen. Unter vielen nach allen Richtungen sich bewegenden Teilen werden also solche sein, deren ursprüngliche Geschwindigkeit unverändert bleibt, dann solche, deren Geschwindigkeit um einen gewissen Betrag vergrößert, und wieder solche, deren Geschwindigkeit um

denselben Betrag verkleinert ist. Im Äther werden daher in der Richtung senkrecht zu den Kraftlinien Schwingungen mit drei verschiedenen, aber nahe bei einander liegenden Schwingungszahlen verlaufen, und diese Schwingungen werden durch ein Prisma oder Beugungsgitter getrennt und geben das wirklich beobachtete Zeemansche Triplet.

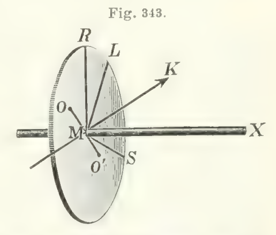
Um das noch deutlicher und schärfer einzusehen, betrachten wir die Vorgänge genauer. Es sei in Fig. 342 ein magnetisches Feld dadurch gegeben, daß ein Nordpol N und ein Südpol S sich einander gegenüberstehen. Die Kraftlinien dieses Feldes haben die Richtung der großen Pfeile. In dem Felde seien schwingende Elektronen vorhanden, die zunächst in beliebiger Bewegung begriffen seien. M sei eines dieser Elektronen. Wir untersuchen diejenigen Lichtbewegungen, die in der Richtung X (senkrecht zu den Kraftlinien) durch den Äther sich fortpflanzen. Da die Lichtbewegungen stets **t r a n s v e r s a l** sind, senkrecht zum Strahl verlaufen (S. 292), so kann eine Bewegung des Teilchens M in der Richtung von X selbst keine Lichtbewegung nach dieser Richtung hin veranlassen, denn eine solche wäre longitudinal. Es kommen also, solange das Feld nicht erregt ist, nur diejenigen Bewegungen von M in Betracht, die senkrecht zu M X verlaufen, also in einer Ebene liegen, die zur Ebene unserer Zeichnung senkrecht steht.

Fig. 342.



Wenn nun aber das magnetische Feld erregt wird, so wird nach der Linken-Hand-Regel gerade das in der Richtung M X sich bewegende Teilchen eine Ablenkung, eine Zusatzgeschwindigkeit bekommen, die senkrecht auf M X und auch senkrecht auf der Richtung der Kraftlinien steht, also in unserer Fig. 342 senkrecht zur Ebene des Papiers steht und entweder vom Papier nach oben oder nach unten geht, je nachdem das bewegte Elektron sich in der Richtung von M nach X, oder von X nach M bewegt hat. Im ersteren Falle haben wir nämlich den Zeigefinger der linken Hand in die Richtung der Kraftlinien, den Mittelfinger von M nach X zu halten, dann geht der Daumen vom Papier nach oben. Im zweiten Fall haben wir den Mittelfinger von X nach M zu halten, dann geht der Daumen nach unten. In Fig. 343 ist eine Ebene senkrecht zum Strahl M X perspektivisch gezeichnet. In dieser stellt der Pfeil K die Richtung der Kraftlinien dar. Dann entsteht durch das magnetische Feld eine Bewegung des Teilchens M entweder nach M O oder nach M O′.

Fig. 343.



Schwingt nun das Teilchen M ganz beliebig im Raum, so kann diejenige Komponente der Schwingung, welche nach M X geht, überhaupt kein Licht erzeugen, das sich in der Richtung M X fortpflanzt, weil diese Bewegung longitudinal wäre. Die übrigbleibenden Schwingungen müssen also ganz in der perspektivisch gezeichneten Ebene verlaufen, also etwa nach M L oder M R oder M S gehen. Diese können zerlegt werden in einen Teil, der die Richtung M K hat, also die Richtung der Kraftlinien, und einen Teil, der senkrecht zu M K steht. Der letztere Teil wird nun gerade durch das Magnetfeld verändert, indem er eine Vergrößerung und Verkleinerung um M O resp. M O′ erfährt.

Es sind also in den wirksamen Richtungen, d. h. in denjenigen Richtungen, durch welche Ätherbewegungen nach X veranlaßt werden, drei verschiedene Geschwindigkeiten vorhanden: eine unveränderte von Teilchen, welche nach M K (also in der Richtung der Kraftlinien) schwingen, und eine vergrößerte und eine um ebensoviel verkleinerte nach der Richtung O O′ (senkrecht zu den Kraftlinien). Daher muß also bei der Brechung oder Beugung das Zeemansche Triplet entstehen.

Aber man sieht noch mehr aus dieser Betrachtung. Die mittelste Linie des Zeemanschen Triplets kommt von Schwingungen der Elektronen her, die in der Richtung MK verlaufen, die beiden äußeren von Schwingungen, die in der Richtung O O′ verlaufen. Lichtbewegungen aber, bei denen alle Teilchen eines Strahles in derselben Richtung schwingen, haben wir oben (S. 353) als polarisierte bezeichnet. Es folgt also:

Das Licht in den drei Linien des Zeemanschen Triplets ist polarisiert. Und noch mehr. Diejenige Ebene, welche durch den Strahl geht und senkrecht zu den Lichtschwingungen steht, nennen wir ja die Polarisationsebene (S. 353). Die Lichtbewegungen also, welche durch M K veranlaßt werden, und welche die mittlere Linie des Triplets erzeugen, haben eine Polarisationsebene, welche senkrecht zu den Kraftlinien steht, die Lichtbewegungen, welche durch O O′ veranlaßt werden, eine solche, welche die Kraftlinien enthält. Wir haben daher die weitere Folgerung:

Die mittlere Linie des Zeemanschen Triplets ist senkrecht zu den magnetischen Kraftlinien polarisiert, die beiden äußeren Linien sind parallel den Kraftlinien polarisiert.

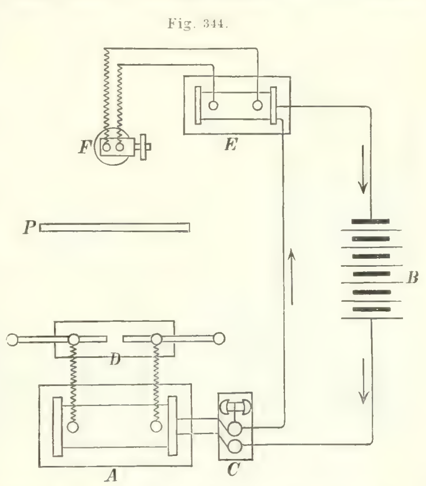
Dieses Resultat unserer Betrachtung ist nun durch die Erfahrung vollständig bestätigt worden und es bildet das umgekehrt eine ausgezeichnete Probe auf unsere Anschauung, nach der es die in der Flamme schwingenden Elektronen sind, welche die Lichtbewegungen hervorrufen. Man kann sogar noch weiter aus der Größe der Geschwindigkeitsänderung, welche das magnetische Feld hervorbringt, das Verhältnis der Ladung eines schwingenden Elektrons zu seiner Masse (S. 310), die sogenannte spezifische Ladung, berechnen, von der wir in den Kapiteln über Gasentladungen und über Radioaktivität so viel gesprochen haben, und man findet für die spezifische Ladung denselben Wert wie bei den Kathodenstrahlen, woraus man schließen muß, daß es die negativen Elektronen sind, welche in den Flammen die betrachteten Schwingungen ausführen.

Das Zeemansche Doublet in der Richtung der Kraftlinien und

seine Polarisationsverhältnisse erklären sich in ganz entsprechender Weise, doch wollen wir darauf nicht eingehen.

Während wir bei der Faradayschen und Zeemanschen Entdeckung Einwirkungen des Magnetismus auf Lichterscheinungen gefunden haben, sind umgekehrt auch Einwirkungen des Lichts auf elektrische Erscheinungen entdeckt worden, und diese bilden einen weiteren interessanten Zusammenhang zwischen optischen und elektrischen Vorgängen. Daß der Widerstand des Selens, wie wir oben S. 84 besprochen haben, durch Beleuchtung herabgesetzt wird, ist schon eine Einwirkung des Lichts auf elektrische Vorgänge. Aber diese Einwirkung ist hier eine indirekte. Es wird nämlich das Selen im Licht chemisch verändert, ähnlich wie eine photographische Platte, es entstehen Modifikationen des Selens, und diese haben eine andere spezifische Leitungsfähigkeit. Von solchen indirekten Einwirkungen des Lichts wollen wir aber hier nicht sprechen, sondern von direkten.

Fig. 344.

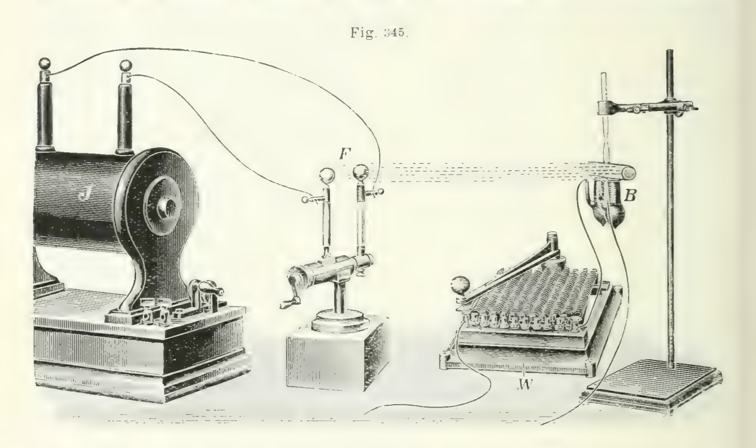


Eine direkte elektrische Wirkung des Lichts wurde von Hertz im Anfang seiner Versuche über rasche elektrische Schwingungen, welche zu so wichtigen Resultaten geführt haben, entdeckt. Wenn er von zwei Induktionsapparaten gleichzeitig Funken erzeugen ließ, so fiel ihm auf, daß diese sich unter Umständen gegenseitig beeinflussen. Um diese Erscheinung deutlich zu machen, benutzte er eine Anordnung, wie sie in Fig. 344 dargestellt ist. Ein größerer Induktionsapparat A und ein kleinerer E wurden so aufgestellt, daß die Funken des ersten bei D zwischen zwei zusammenschiebbaren Metallstangen übersprangen, während die des zweiten zwischen den verschiebbaren Kugeln eines Funkenmikrometers F (S. 298) übergingen. Die primären Rollen beider Induktionsapparate wurden von demselben Strom betrieben, der durch einen besonderen Unterbrecher C geöffnet und geschlossen wurde. Der primäre Strom ging von einer Batterie B durch den Unterbrecher C zur primären Rolle von A, dann zur primären Rolle von E und zur Batterie zurück. Wenn man nun die Stangen in D und die Kugeln in F so weit auseinanderschob, daß in beiden Apparaten noch gerade ein regelmäßiger Funkenübergang stattfand (wobei die Funken in D etwa 10 mm, die in F etwa 2 mm lang waren), so hörten beide Funkenübergänge sofort auf, wenn man zwischen D und F eine Platte aus Metall oder Glas oder Holz oder Kautschuk oder Papier oder

Glimmer u. s. w. einschaltete. Hertz erkannte bald, daß es das Licht, das von den Funkenstrecken ausgeht, ist, welches diese Erscheinung verursacht. In jeder der beiden Funkenstrecken geht die Entladung leichter vor sich, wenn sie von dem Licht der anderen beleuchtet ist. Eine dazwischen gestellte Platte aus einem Stoff, welcher das Licht abhält, läßt auch die Funken erlöschen. Aber nicht alles Licht ist wirksam, sondern nur das Licht von sehr kurzer Wellenlänge, das ultraviolette Licht. Deshalb verhalten sich Glas und Glimmer wie undurchsichtige Körper, sie absorbieren nämlich das ultraviolette Licht. Dagegen andere Körper, wie Gips (Marienglas), Bergkristall, Wasser, welche ultraviolettes Licht durchlassen, lassen auch diese Wirkung durch sich hindurch.

Daß in der Tat nur das Licht und zwar das ultraviolette Licht das Wirksame bei diesem Versuch ist, nicht etwa sonstige Eigenschaften des

Fig. 345.

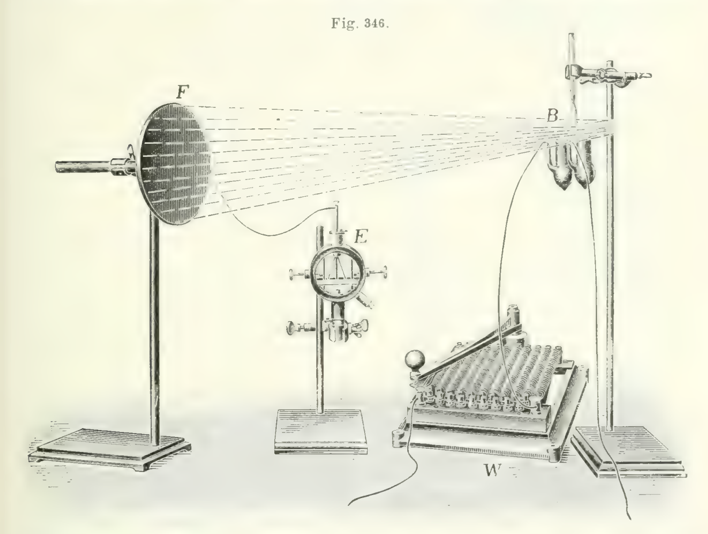


Funkens, wurde von Hertz unzweifelhalt dadurch bewiesen, daß er an Stelle der einen Funkenstrecke einfach eine Bogenlampe stellte. Man kann das sehr bequem zeigen, wenn man eine Quecksilberbogenlampe aus Quarzglas (S. 118) anwendet. Diese sendet viel ultraviolettes Licht aus. Wenn man also, wie in Fig. 345, einen Induktionsapparat J mit einem Funkenmikrometer F verbindet und die Kugeln desselben so weit auszieht, daß gerade kein regelmäßiger Funkenübergang zwischen ihnen stattfindet, so erhält man sofort einen ordentlichen und kräftigen Funkenstrom, sobald man das Licht der Quecksilberbogenlampe B (in die man einen Strom durch den Widerstand W sendet) auf die Funkenstrecke fallen läßt. Das Licht der Bogenlampe enthält viel mehr ultraviolettes Licht als das Tageslicht, und ist für diese Versuche viel wirksamer als Sonnenlicht.

Es hat sich weiter gezeigt, daß bloß die Bestrahlung der negativ geladenen Kugel die Entladung hervorbringt, nicht die Bestrahlung der übrigen Teile der Funkenstrecke.

Die Tatsache dieser Einwirkung des Lichtes auf die elektrische Entladung war damit in einfachster Weise konstatiert, aber was die Ursache derselben ist, blieb zunächst unbekannt. Eine Aufklärung erhielten diese Experimente erst durch Versuche von H a l l w a c h s, welcher zeigte, daß negativ geladene Körper durch Bestrahlung mit ultraviolettem Licht ihre negative Elektrizität verlieren. Man kann diesen Versuch in einfacher Weise so anstellen, wie es Fig. 346 zeigt. Man stellt eine Zinkplatte F, die mit einem wohl isolierenden Griff versehen ist, auf, verbindet sie mit einem Goldblattelektroskop E und ladet sie durch eine geriebene Ebonitstange negativ elektrisch. Das Elektroskop gibt durch seinen Ausschlag die Spannung an, die, wenn alles gut isoliert ist, sich konstant hält.

Fig. 346.

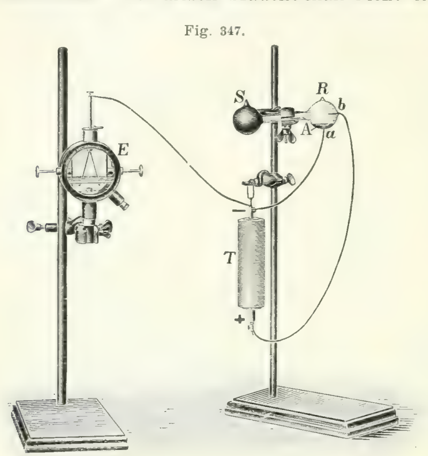


Sobald man aber von einer Bogenlampe B, wieder am besten von einer Quecksilberbogenlampe aus Quarzglas, Licht auf die Platte wirft, so gehen die Blättchen des Elektroskops rasch zurück, die Platte wird entladen.

Man bezeichnet diese Erscheinung als l i c h t e l e k t r i s c h e oder auch als a k t i n o e l e k t r i s c h e Wirkung. Ist die Platte F positiv geladen, so wird sie durch das Licht nicht entladen. Ist aber die Platte F ungeladen, und läßt man Licht auf sie fallen, so wird sie schwach positiv elektrisch. Diese Versuche sagen direkt aus, daß bei der Bestrahlung mit ultraviolettem Licht negative Elektrizität von den Metallen entweicht. Sie sind infolgedessen in gewisser Weise ähnlicher Natur — und in Wirklichkeit schon vorher bekannt gewesen — wie die Versuche, durch welche die Entladung geladener Körper unter dem Einfluß von Röntgenstrahlen (S. 325) oder radioaktiven Substanzen (S. 337) bewiesen wird. Indes ist doch ein wesentlicher Unterschied vorhanden. Die Röntgenstrahlen und

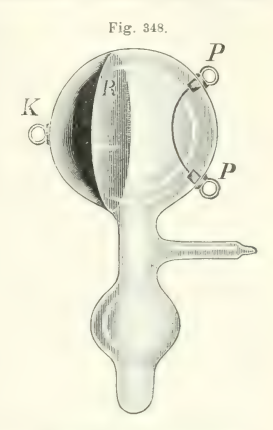
die radioaktiven Substanzen haben als direkte, primäre Wirkung die, daß sie die Luft ionisieren (o. S. 327), und erst sekundär indirekt ergibt sich daraus eine Entladung von geladenen Körpern, wobei sowohl positive wie negative Ladungen entweichen. Hier aber bei der Bestrahlung mit ultraviolettem Licht ist das Primäre die Entladung der geladenen Körper, wobei die Wirkung sich nur auf die negative Ladung erstreckt. Die negativen Elektronen entweichen aus dem geladenen Körper, wenn er ultraviolett bestrahlt wird. Es spielt hier bei den aktinoelektrischen Wirkungen auch die Natur des Stoffes, auf welchen das Licht fällt, eine Rolle. Nicht alle Metalle zeigen diese Wirkung gleich gut. Unter den bekannteren Metallen ist Zink das geeignetste, besser aber gelingen die Versuche noch mit den Amalgamen des Kaliums, Natriums und Rubidiums. Bei diesen braucht man nicht eine so starke Quelle ultravioletten Lichts, wie es eine Bogenlampe ist, sondern kann die Versuche schon im gewöhnlichen Tageslicht anstellen. Eine hübsche und bequeme Anordnung dafür zeigt Fig. 347. Nach dem Vorschlag von Elster und Geitel, welche die große Wirksamkeit des Natriumamalgams gefunden haben, werden Röhren in den Handel gebracht, wie die mit R bezeichnete, welche zwei eingeschmolzene Elektroden besitzen, a und b. Die Röhre enthält das flüssige Amalgam, welches durch Neigen der Röhre entweder in die geschwärzte Kugel S oder in die durchsichtige Kugel R gebracht werden kann. Zu dem Versuch wird es in die helle Kugel R gebracht, so daß es die Elektrode a bedeckt. Durch eine Trockensäule T (S. 57) wird das Amalgam negativ geladen, indem der negative Pol der Säule mit der Elektrode a verbunden wird, und zugleich ist mit diesem Pol, also auch mit dem Amalgam, ein Exnersches Goldblattelektroskop E (S. 17) in Verbindung gesetzt, so daß dieses die Ladung durch den Ausschlag der Goldblättchen anzeigt. Den positiven Pol der Batterie kann man mit der anderen Elektrode b in Verbindung bringen. Die Röhre ist im übrigen ziemlich luftleer gemacht. Sowie nun Tageslicht auf das Amalgam fällt, fallen die Blättchen des Elektroskops zusammen, weil rasch negative Elektrizität aus dem Amalgam entweicht, so rasch, daß die Trockensäule den Verlust nicht in der gleichen Zeit decken kann. Wird das Tageslicht abgeblendet, so spreizen sich die Blättchen wieder auseinander.

Fig. 347.



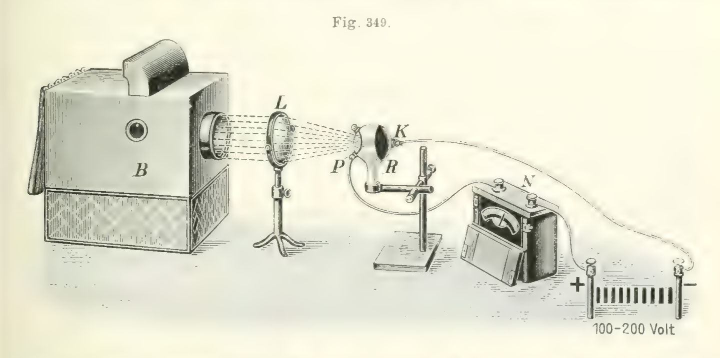
Es findet hierbei, wie gesagt, ein direkter Fortgang von negativen Elektronen von der bestrahlten Fläche statt. Man kann sogar durch diese sich fortbewegenden Elektronen einen elektrischen Strom erzeugen, den man durch ein ziemlich empfindliches Galvanometer messen kann. Dazu eignen sich gut Röhren mit Rubidiumamalgam, wie sie von der Gesellschaft Polyphos in München in den Handel gebracht werden. Fig. 348 zeigt eine solche Zelle. In einem Glasgefäß, das mit Wasserstoff oder Helium unter geringem Druck gefüllt ist, befindet sich bei R ein Spiegel aus Rubidiumamalgam, der mit der Öse K verbunden ist. Ihm gegenüber ist ein Platindraht P in die Röhre eingeschmolzen. K wird mit dem negativen Pol einer Batterie (100—200 Volt) verbunden. Bei Belichtung des Rubidiums durch eine Bogenlampe gehen die negativen Elektronen von R fort, fallen auf den Draht, und wenn P durch ein passend empfindliches Galvanometer, z. B. das Nadirinstrument (S. 190), mit der Stromquelle verbunden ist, so zeigt sich der Strom durch einen Ausschlag desselben an. Fig. 349 gibt die Anordnung des Versuchs. Bei B ist eine Bogenlampe, deren Licht durch eine Linse L auf den Rubidiumspiegel geworfen wird, bei N ist das Nadirinstrument.

Fig. 348.



Wenn die bestrahlte Metallfläche bei diesen Versuchen sich in einem möglichst luftleeren Raum befindet, so gehen die Elektronen geradlinig

Fig. 349.



durch den Gasraum hindurch und bilden Kathodenstrahlen, deren Wirkungen zwar nicht so kräftig sind wie die der gewöhnlichen, die aber genau dieselben Eigenschaften haben und dieselben Gesetze befolgen wie diese.

Es ist nicht wahrscheinlich, daß mit den in diesem Kapitel erwähnten Tatsachen die Beziehungen zwischen Elektrizität und Magnetismus einer-

seits und zwischen dem Licht andererseits erschöpft sind. Vorläufig nur sind bloß die angeführten Tatsachen zu unserer Kenntnis gekommen. Durch Verfeinerung der Hilfsmittel werden wahrscheinlich noch weitere Beziehungen, die man zum Teil nach unseren bisherigen Kenntnissen voraussehen kann, ohne daß sie sich bisher wirklich beobachten ließen, entdeckt werden. Und vielleicht wird in späteren Jahren gerade dieser Zusammenhang zwischen Elektrizität und Licht das allergrößte Interesse bieten.

Aus allen Erörterungen dieses ersten Teiles unserer Betrachtungen hat sich ergeben, daß sich die Elektrizität fast unmittelbar, fast ohne besondere Hilfsmittel in alle anderen Erscheinungsformen der Naturkräfte umwandeln läßt, eine Eigenschaft, welche die Elektrizität allen anderen Naturkräften voraus hat. Und zu dieser Eigenschaft kommen noch die beiden großen Vorzüge hinzu, daß sich der elektrische Strom mit außerordentlicher Geschwindigkeit fortpflanzt, und daß er immer auf vorgeschriebenen Bahnen, auf den Leitungsdrähten, bleibt. So kann man die Elektrizität in einem Moment hinleiten, wohin man will, und kann ihre Wirkungen hervorbringen, wo man will, ganz unabhängig von dem Ort, wo man sie erzeugt hat. Die Elektrizität überwindet gewissermaßen Raum und Zeit. Keine andere Naturkraft hat diese brauchbaren Eigenschaften, und daher ist keine andere Naturkraft, selbst die Wärme nicht, in so eminentem Maße anwendbar, wie die Elektrizität.

15. Kapitel.

Die elektrischen Maßeinheiten.

In zweifacher Weise dringt die Physik immer weiter in die Geheimnisse der Natur ein. Der erste Schritt besteht in der qualitativen Erforschung neuer Erscheinungen, neuer, bisher verborgener Kräfte und neuer Wirkungen vorhandener Kräfte, der zweite ist die quantitative, messende Feststellung ihrer Gesetze, die zahlen- und formelmäßige Untersuchung der Abhängigkeit der verschiedenen physikalischen Erscheinungen voneinander. Die Entdeckung der Induktionserscheinungen durch Faraday z. B. war der erste Schritt zu der Erweiterung unserer Kenntnisse auf diesem Gebiet; die gesetzmäßige Feststellung der Abhängigkeit der induzierten elektromotorischen Kraft von Stärke, Richtung, Form und relativer Geschwindigkeit des induzierenden Stromes war der zweite, nicht minder wichtige und folgenreiche Schritt.

Die Messung einer jeden physikalischen Größe kann zuerst nach einem ganz beliebigen Maß geschehen, sobald dieses Maß nur ein sicher definiertes ist. Wir können Stromstärken nach Kubikmillimetern Knallgas messen oder nach Grammen Kupfer, wir können elektromotorische Kräfte nach Daniell messen oder nach Ausschlägen der Elektrometernadel u. s. w. Die Physik aber hat mit immer größerer Schärfe und Deutlichkeit den Zusammenhang eruiert, der zwischen ihren verschiedenen Gebieten herrscht, sie hat in immer weiterem Umfang die qualitative und quantitative Umwandlungsfähigkeit der verschiedenen Formen der Energie, die als mechanische Energie, als Wärmeenergie, als elektrische oder als chemische Energie auftritt, ineinander gezeigt. Dieser Zusammenhang der aus verschiedenen physikalischen Gebieten entnommenen Größen wies nun auf die Möglichkeit und Notwendigkeit hin, auch zu ihrer Messung Maße anzuwenden, welche nicht mehr willkürlich sind, sondern miteinander in Beziehung stehen. Es ergab sich die Möglichkeit, alle physikalischen Größen in Einheiten auszudrücken, welche von einigen Grundeinheiten in bestimmter Weise abgeleitet sind. Gauß und Wilhelm Weber waren es, welche zuerst ein solches System von Einheiten aufstellten und durchführten, und dieses System nennt man das absolute Maßsystem.

Die praktische Messung aller physikalischen Größen, zu welchem Erscheinungsgebiet sie auch gehören, führt nämlich stets zurück auf Messung von Längen, Zeiten und Massen. Dies sind die einzigen Operationen, welche in verschiedener Form bei jeder praktischen Messung allein vorkommen. Es werden sich also auch die Zahlenwerte sämtlicher physikalischen Größen in eindeutiger, unveränderlicher, bestimmter Weise ergeben, falls man nur für diese drei Größen bestimmte Einheiten festsetzt. Diese Erwägung führt dazu, die Einheiten der Länge, Masse

und Zeit als Grundeinheiten für das absolute Maßsystem zu verwenden, und zwar wird in wissenschaftlichen Messungen als Einheit der Länge stets das Zentimeter, als Einheit der Zeit die Sekunde, als Einheit der Masse das Gramm angenommen.

Das absolute System, bei welchem Zentimeter, Gramm und Sekunde als Grundeinheiten gewählt sind, nennt und schreibt man das „C. G. S. - System".

Von den drei Grundeinheiten lassen sich nun für alle physikalischen Größen Einheiten ableiten, die man deswegen abgeleitete Einheiten nennt. Wir beginnen mit einigen räumlichen und mechanischen Größen.

1. Fläche. Als Maß für eine Fläche gilt ein Quadrat von beliebiger Seitenlänge.

Um bei unseren Einheiten zu bleiben, nehmen wir als Seitenlänge 1 cm und haben also als absolute Einheit der Fläche im C.G.S.-System 1 qcm. Diese Flächeneinheit ist daher bereits eine abgeleitete Einheit.

2. Volumen. Als Maß für ein Volumen gilt ein Würfel von beliebiger Seitenlänge. Die absolute Einheit des Volumens ist im C.G.S.-System daher 1 ccm.

Ein Volumen von 3 cbm ist daher im C.G.S.-System auszudrücken durch die Zahl 3 Millionen (Benennung: Kubikzentimeter).

Je kleiner die Einheit ist, desto größer ist die Zahl, durch welche eine bestimmte Größe in dieser Einheit ausgedrückt wird.

3. Geschwindigkeit. Als Geschwindigkeit eines sich gleichförmig bewegenden Körpers definiert man das Verhältnis des von ihm zurückgelegten Weges zu der Zeit, welche er zur Zurücklegung braucht.

Die Einheit der Geschwindigkeit im C.G.S.-System ist also diejenige, bei welcher 1 cm in 1 Sekunde durchlaufen wird.

4. Beschleunigung. Unter der Beschleunigung eines Körpers versteht man das Verhältnis seiner Geschwindigkeitszunahme zu der Zeit, in welcher er diese Zunahme erlangt.

Die absolute Einheit der Beschleunigung ist also diejenige, bei der die Geschwindigkeit eines Körpers in der Zeiteinheit (1 Sekunde) sich um die Geschwindigkeitseinheit (1 cm pro Sekunde) erhöht.

5. Kraft. Unter der Kraft, welche auf eine Masse wirkt, versteht man nach der Definition der Mechanik das Produkt aus dieser Masse und der Beschleunigung, welche sie durch die Kraft erhält.

Die Einheit der Kraft ist also diejenige, welche der Einheit der Masse die Beschleunigung 1 erteilt.

Im C.G.S.-System hat daher die Einheit der Kraft eine solche Größe, daß sie der Masse 1 g die Einheit der Beschleunigung (Nr. 4) erteilt. Diese Krafteinheit bezeichnet man mit einem besonderen Namen, nämlich „1 Dyne". Es werden also im C.G.S.-System alle Kräfte nach Dynen gemessen.

Unsere Gewichte sind Kräfte; sie geben uns nämlich die Kraft an, mit welcher die Erdschwere auf die ihnen gleichbenannten Massen wirkt. Das Gewicht, die Kraft eines Kilogramms ist gleich der Masse eines Kilogramms multipliziert mit der Beschleunigung, welche die Erdschwere

dieser Masse erteilen würde, wenn sie frei beweglich wäre. Da die Masse eines Kilogramms 1000 g enthält und da die angeführte Beschleunigung 981 Beschleunigungseinheiten im C.G.S.-System hat, so ist die Kraft eines Kilogramms gleich 981 000 ($9{,}81 \cdot 10^5$) Dynen.

6. Arbeit. Wenn ein Körper sich unter der Wirkung einer Kraft bewegt, so leistet die Kraft eine Arbeit, deren Größe gleich ist dem Produkt aus der Kraft und der Wegstrecke, um welche sich der Körper in Richtung der Kraft fortbewegt hat.

Daher ist im C.G.S.-System die Arbeitseinheit diejenige, welche die Kraft 1 Dyne leistet, wenn sie die angegriffene Masse um 1 cm verschiebt. Diese Arbeitseinheit bezeichnet man mit dem besonderen Namen „1 Erg".

Wenn z. B. ein Kilogramm um einen Meter gehoben wird, so ist die dazu nötige Arbeit $= 981\,000 \times 100 = 98\,100\,000$ Erg.

Die Arbeit „1 Kilogrammeter", welche in der Technik gewöhnlich gebraucht wird, enthält also 98 100 000 ($9{,}81 \times 10^7$) Erg.

Die Arbeit ist nur von dem ganzen zurückgelegten Wege abhängig, durchaus nicht von der größeren oder geringeren Zeit, in welcher dieser Weg zurückgelegt wird.

7. Effekt einer Kraft. Wenn eine Kraft eine Arbeit leistet, so nennt man das Verhältnis der geleisteten Arbeit zu der Zeit, in welcher sie geleistet wird, den Effekt der Kraft.

Im C.G.S.-System ist also die Einheit des Effektes diejenige, bei welcher 1 Erg in 1 Sekunde geleistet wird. Diese Einheit ist für die gewöhnlich vorkommenden Effekte zu klein und man ist daher übereingekommen, das Zehnmillionenfache (10^7fache) dieser Einheit mit einem besonderen Namen zu bezeichnen, nämlich 1 Watt.

Ein Watt ist also derjenige Effekt, bei welchem in 1 Sekunde 10 Millionen Erg geleistet werden.

In der Technik ist auch das Watt eine zu kleine Einheit, und die Techniker nehmen daher als Maßeinheit des Effektes das Tausendfache eines Watt unter der Bezeichnung 1 Kilowatt. Eine Maschine hat also einen Effekt von 1 Kilowatt, wenn sie in jeder Sekunde 1000 × 10 Millionen (10^{10}) Erg leistet. Bisher mißt man in der Technik den Effekt von Maschinen gewöhnlich noch nach Pferdekräften, und dieser Gebrauch kommt erst allmählich ab. Unter einer Pferdekraft versteht man denjenigen Effekt, bei welchem in je 1 Sekunde eine Arbeit von 75 Kilogrammmetern geleistet wird. Da 1 Kilogrammeter nach Nr. 6 gleich $9{,}81 \cdot 10^7$ Erg ist, so ist also eine Pferdekraft in Watt ausgedrückt $= 9{,}81 \times 75$. Das abkürzende Zeichen für die Pferdekraft ist PS, so daß wir haben

$$1\ \text{PS} = 736\ \text{Watt} = 0{,}736\ \text{Kilowatt}.$$

Da der Effekt einer Kraft die in jeder Sekunde von der Kraft geleistete Arbeit darstellt, so gibt das Produkt aus diesem Effekt und der ganzen Zeit in Sekunden, in welcher die Kraft wirkt, die ganze Arbeit, welche diese Kraft während dieser Zeit geleistet hat. Man multipliziert nun auch häufig, um diese Arbeit darzustellen, die Benennungen des Effektes und der Zeit und spricht also von Wattstunden, Kilowattstunden, Pferdekraftstunden u. dergl. Es ist also z. B. 1 Kilowattstunde gleich der Arbeit von

$$60 \times 60 \times 10^{10} \text{ Erg} = 36 \times 10^{12} \text{ Erg}$$
$$= \frac{36 \,.\, 10^{12}}{9{,}81 \,.\, 10^{7}} \text{ Kilogrammeter} = 3{,}67 \,.\, 10^{5} \text{ Kilogrammeter.}$$

In dieser Weise haben wir für einige der wichtigsten mechanischen Größen aus ihrer bloßen Definition absolute Einheiten entwickelt und wir können nun dazu übergehen, dasselbe für die elektrischen und magnetischen Größen zu tun.

Wir beginnen mit den magnetischen Einheiten.

8. Polstärke. Einem magnetischen Pol schreiben wir eine gewisse Polstärke zu. Zwei magnetische Pole ziehen sich dann mit einer Kraft an, die gleich ist dem Produkt ihrer Polstärken, dividiert durch das Quadrat ihrer Entfernung.

Da wir die Einheit der Kraft bereits festgestellt haben, nämlich 1 Dyne, und die der Entfernung auch (1 cm), so können wir daraus die Einheit der Polstärke bestimmen.

Die Einheit der Polstärke hat derjenige Pol, welcher auf einen gleich starken, in der Entfernung 1 cm befindlichen Pol die Kraft 1 Dyne ausübt.

Ein wirklicher Magnet hat immer zwei Pole, einen nordmagnetischen und einen südmagnetischen. Man bezeichnet als das magnetische Moment eines Magneten das Produkt aus der Polstärke seines Nordpols und dem Abstand seiner Pole.

Es wird also die Einheit des magnetischen Moments diejenige sein, welche ein Magnet hat, dessen Pole um 1 cm voneinander abstehen und dessen Polstärke in jedem Pol die Einheit ist.

9. Magnetische Feldstärke. Ein drehbarer Magnetstab erfährt in einem magnetischen Feld eine Drehung, es wird ein Drehungsmoment auf ihn ausgeübt, welches gleich dem Produkt aus der Feldstärke und dem Moment des Stabes ist. Da ein Drehungsmoment gleich einer Kraft mal dem Hebelarm ist, an dem sie wirkt, so ist die Einheit des Drehungsmomentes das Produkt aus 1 Dyne mal 1 cm. Daraus folgt, daß die Einheit der Feldstärke diejenige ist, welche auf einen Magnetstab vom Moment 1 (Nr. 8) die Einheit des Drehungsmomentes ausübt.

Statt des Wortes Feldstärke braucht man auch das Wort „Kraftlinienzahl pro Quadratzentimeter“, indem man sich durch jeden Quadratzentimeter des Feldes gerade so viel Kraftlinien gelegt denkt, als die Feldstärke an dieser Stelle beträgt.

So wie wir hier von einem durch die Erfahrung bewiesenen Anziehungsgesetz ausgegangen sind, um daraus eine Definition und Einheit der Polstärke und der anderen magnetischen Größen abzuleiten, so können und müssen wir auch bei den elektrischen Größen von bestimmten Gesetzen ausgehen, um aus diesen Definitionen und Einheiten für sie zu finden. Dabei hat es sich infolge der vielen Wechselbeziehungen zwischen galvanischen Strömen und Magneten als vorteilhaft erwiesen, dasjenige Gesetz zu Grunde zu legen, welchem diese Wechselbeziehungen unterworfen sind, nämlich das Biot-Savartsche Gesetz. Man nennt das System von elektrischen Einheiten, welches auf diesem Gesetz basiert, deshalb auch das elektromagnetische Maßsystem. Dieses soll hier entwickelt werden.

10. Stromstärke. Wir gehen aus von der Kraft, welche ein Strom auf einen Magneten ausübt. Wir haben das Gesetz derselben auf S. 178 angeführt. Danach verhält sich ein Stromkreis genau wie ein Magnet, dessen magnetisches Moment gleich der Stromstärke multipliziert mit der vom Strom umflossenen Fläche ist.

Da wir die Einheit für das magnetische Moment schon haben (Nr. 8), so entnehmen wir hieraus die Definition für die Einheit der Stromstärke.

Die Einheit der Stärke hat also derjenige Strom, welcher, wenn er ein Quadratzentimeter umfließt, magnetisch so wirkt wie ein Magnet, dessen magnetisches Moment gleich der Einheit ist.

Diese absolute Einheit hat keinen besonderen Namen. Man nimmt vielmehr praktisch eine Einheit an, welche gleich dem 10. Teil dieser so definierten Einheit der Stromstärke ist, und nennt diese Einheit 1 Ampere. 1 Ampere ist also $= \frac{1}{10}$ Einheit der Stromstärke im C.G.S.-System.

11. Elektrizitätsmenge. Unter der Stromstärke verstanden wir immer diejenige Menge Elektrizität, welche in der Zeiteinheit durch jeden Querschnitt eines Leiters fließt.

Danach werden wir diejenige Elektrizitätsmenge die Einheit nennen, welche, wenn sie in einer Sekunde durch einen Querschnitt fließt, die Einheit der Stromstärke, 1 Ampere, erzeugt.

Man nennt diese Einheit der Elektrizitätsmenge 1 Coulomb.

Es ist also 1 Coulomb $=$ 1 Ampere $\times$ 1 Sekunde.

Eine Amperestunde ist daher gleich $60 \times 60 = 3600$ Coulomb.

12. Elektromotorische Kraft. Ein jeder Strom besitzt einen gewissen Effekt, da er in jeder Sekunde eine gewisse Arbeit leisten kann. Wir wissen, daß dieser Effekt gleich dem Produkt aus der elektromotorischen Kraft und der Stromstärke ist.

Daraus entnehmen wir eine Definition und eine Einheit für die elektromotorische Kraft.

Unter der Einheit der elektromotorischen Kraft verstehen wir diejenige, welche, wenn sie einen Strom von der Einheit der Stärke durch den Stromkreis treibt, die Einheit des Effektes erzeugt.

Für praktische Zwecke geht man dabei auch auf die praktische Effekteinheit, nämlich 1 Watt, zurück und nimmt daher als Einheit der elektromotorischen Kraft diejenige an, welche, wenn sie den Strom 1 Ampere durch den Stromkreis treibt, einen Effekt von 1 Watt erzeugt. Diese Einheit der elektromotorischen Kraft nennt man 1 Volt. Es ist daher 1 Volt $\times$ 1 Ampere $=$ 1 Watt. In elektrischen Berechnungen ersetzt man deshalb auch zuweilen das Wort Watt durch Volt-Ampere, welche beide (bei Gleichströmen) genau denselben Effekt bezeichnen. Da nun, wie wir oben (Nr. 7) gesehen, 1 PS $=$ 736 Watt ist, so ist

$$1 \text{ Volt} \times 1 \text{ Ampere} = \frac{1}{736} \text{ PS}.$$

13. Spannung. Da die elektromotorische Kraft nichts weiter ist als die Differenz zweier Spannungen, so ist von vornherein klar, daß die Einheit der Spannung dieselbe ist wie die Einheit der elektromotorischen Kraft, also für praktische Zwecke 1 Volt.

14. Widerstand. Nach dem Ohmschen Gesetz ist der Widerstand eines Stromkreises gleich dem Verhältnis der in ihm wirkenden elektromotorischen Kraft zu der durch sie erzeugten Stromstärke.

Die praktische Einheit des Widerstandes ist also derjenige Widerstand, in welchem die Einheit der elektromotorischen Kraft, 1 Volt, die Einheit der Stromstärke, 1 Ampere, erzeugt.

Man nennt diese Widerstandseinheit 1 Ohm. Es gilt daher auch das Ohmsche Gesetz für die Einheiten

$$1 \text{ Ampere} = \frac{1 \text{ Volt}}{1 \text{ Ohm}}, \text{ also auch: } 1 \text{ Volt} = 1 \text{ Ampere} \times 1 \text{ Ohm}.$$

15. Kapazität. Unter der Kapazität eines Kondensators verstanden wir das Verhältnis der Elektrizitätsmenge auf seiner Kollektorplatte zu ihrer Spannung, vorausgesetzt, daß die Kondensatorplatte zur Erde abgeleitet ist.

Die Einheit der Kapazität hat also derjenige Kondensator, welcher, wenn er mit der Einheit der Elektrizitätsmenge, 1 Coulomb, geladen ist, gerade die Spannung 1 Volt besitzt.

Man nennt diese Einheit der Kapazität 1 Farad. Es ist also

$$1 \text{ Farad} = \frac{1 \text{ Coulomb}}{1 \text{ Volt}}.$$

Den millionsten Teil dieser Kapazität nennt man 1 Mikrofarad.

16. Selbstpotential. Unter dem Selbstpotential eines Stromkreises verstanden wir (S. 227) diejenige von der Form des Stromkreises abhängende Größe, welche, wenn man sie mit der Änderung der Stromstärke pro Zeiteinheit in diesem Kreis multipliziert, die elektromotorische Kraft des entstehenden Extrastromes angibt.

Wir werden also als Einheit des Selbstpotentials dasjenige nehmen, welches ein Stromkreis besitzt, in welchem gerade die elektromotorische Kraft 1 Volt erzeugt wird, wenn sich in ihm die Stromstärke in 1 Sekunde um 1 Ampere ändert. Diese Einheit nennt man 1 Henry.

Es ist also

$$1 \text{ Henry} = \frac{1 \text{ Volt} \times 1 \text{ Sekunde}}{1 \text{ Ampere}}.$$

Da $\frac{1 \text{ Volt}}{1 \text{ Ampere}} = 1$ Ohm ist, so ist auch

$$1 \text{ Henry} = 1 \text{ Ohm} \times 1 \text{ Sekunde}.$$

Deswegen benutzten die Engländer häufig statt des Wortes Henry das geschmacklos gebildete Wort Secohm.

Den tausendsten Teil von 1 Henry nennt man ein Millihenry.

Damit sind die wesentlichsten elektrischen Größen auf bestimmte Einheiten zurückgeführt, die auch mit den mechanischen Einheiten der Länge, Masse, Zeit, Kraft, Arbeit, Effekt in einfachem Zusammenhang stehen.

Die größeren und kleineren Vielfachen der praktischen Einheiten werden häufig, wie es schon in einigen Fällen angegeben wurde, durch

Vorsetzen gewisser Silben bezeichnet. Die Vorsilbe M e g bezeichnet nämlich das Millionenfache der Einheit. Es ist also

1 Megohm = 1 Million Ohm.

Die Vorsilbe M i k r o bedeutet den millionsten Teil der Einheit. Es ist also

1 Mikroampere = 1 Millionstel Ampere, 1 Mikrocoulomb = 1 Millionstel Coulomb, 1 Mikrovolt = 1 Millionstel Volt, 1 Mikrofarad = 1 Millionstel Farad.

Endlich bedeutet M i l l i den tausendsten Teil der Einheit. Also ist

1 Millivolt = 1 Tausendstel Volt, 1 Milliampere = 1 Tausendstel Ampere, 1 Millihenry = 1 Tausendstel Henry.

Es genügt natürlich für praktische Zwecke nicht, bestimmte Einheiten für die einzelnen Größen wissenschaftlich definiert zu haben, es müssen auch zum Gebrauch bestimmte Normaleinheiten vorhanden sein, die stets leicht reproduzierbar sind und deren Verhältnis zu den absoluten Einheiten ein für allemal genau bestimmt ist.

Da die drei Größen Stromstärke, Widerstand und elektromotorische Kraft nach dem Ohmschen Gesetz miteinander verbunden sind, so genügt es, für zwei von ihnen die Einheit festgestellt zu haben. Dies ist nun geschehen für die Stromstärke und den Widerstand. Es kam also darauf an, die Stromstärke 1 Ampere so zu bestimmen, daß sie immer reproduzierbar ist, und ebenso den Widerstand 1 Ohm.

Für die S t r o m s t ä r k e geschieht das dadurch, daß man ein für allemal untersucht, wieviel Knallgas oder Kupfer oder Silber der Strom 1 Ampere (der in Nr. 10 definiert wurde) in der Sekunde in einem Voltameter abscheidet. Diese Bestimmung ist von F. und W. Kohlrausch exakt durchgeführt worden und lieferte das Resultat, daß 1 Ampere in 1 Sekunde 0,1740 ccm Knallgas von normalem Druck und normaler Temperatur entwickelt, oder 0,3284 mg Kupfer oder 1,118 mg Silber abscheidet. Aus diesen Messungen ergibt sich folgende Tabelle:

	Der Strom 1 Ampere zersetzt oder scheidet aus				
	mg Silber	mg Kupfer	mg Wasserstoff	mg Wasser	ccm Knallgas von 0° und 760 mm Druck
in 1 Sekunde	1,1181	0,3284	0,01039	0,0933	0,1740
in 1 Minute	67,09	19,70	0,623	5,60	10,44

Damit kann man nun durch Messung mit einem Voltameter jede Stromstärke in Ampere ausdrücken.

Ebenso kam es darauf an, den W i d e r s t a n d 1 Ohm ein für allemal zu fixieren, also etwa die Länge einer Quecksilbersäule von 0° zu bestimmen, welche bei 1 qmm Querschnitt gerade den Widerstand 1 Ohm hat. Die genauesten Messungen liefern nun dafür das Resultat, daß

diese Quecksilbersäule 106,3 cm Länge haben muß. Praktisch und gesetzlich wird daher 1 Ohm definiert als der Widerstand einer Quecksilbersäule von 106,3 cm Länge und 1 qmm Querschnitt.

Die elektromotorische Kraft eines Stromerzeugers kann man nun immer in Volt ausdrücken, wenn man sie in einem Stromkreis einen Strom erzeugen läßt. Praktisch benutzt man jedoch häufig die Westonelemente (S. 98) als Vergleichselemente, da deren elektromotorische Kraft unveränderlich gleich 1,019 Volt (zwischen 10 u. 20°) gefunden wurde, oder auch die Clarkelemente, deren elektromotorische Kraft gleich 1,438 Volt (bei 15°) ist.

Auch für Kapazitäten hat man genaue Normalen konstruiert, nämlich die Mikrofarad, von denen S. 19 eine Abbildung gegeben ist. Dieselben bestehen aus Kondensatoren, die gerade 1 Mikrofarad Kapazität besitzen. Häufig sind diese noch, wie die Gewichtssätze, in Unterabteilungen geteilt, so daß sie Kapazitäten von 0,1, 0,2, 0,2, 0,5 Mikrofarad enthalten.

Ebenso werden auch für das Selbstpotential Normale angefertigt, 1 Henry oder größere oder kleinere Unterabteilungen desselben darstellend, von denen auf S. 228 eine Abbildung gegeben war.

In dieser Weise sind also die Maßeinheiten in der Elektrizität alle bestimmt und auf sichere Erfahrungen und Grundsätze zurückgeführt.

II. Teil.

Die Anwendungen der Elektrizität.

II. Teil.

Die Anwendungen der Elektrizität.

1. Kapitel.

Die Dynamomaschinen für Gleichstrom.

Die große Leichtigkeit, mit der sich die elektrische Energie in andere Formen umwandeln läßt, in Licht, in Wärme, in Magnetismus, in chemische Energie, in mechanische Bewegung, diese Leichtigkeit macht die Elektrizität ganz außerordentlich zur praktischen Verwendung geeignet. Ein Lichtstrahl bleibt stets ein Lichtstrahl, er leuchtet und erwärmt, aber seine Energie läßt sich nicht (oder nur unvollkommen und schwierig) in andere Formen der Energie umwandeln. Ein elektrischer Strom dagegen braucht nur durch getrennte Kohlenspitzen gesendet zu werden, um Licht zu erzeugen; er braucht nur durch Drähte gesendet zu werden, um Wärme und Licht hervorzubringen; um einen Eisenkern spiralförmig herumgeführt, erzeugt er Magnetismus; in die Nähe eines anderen Stromes oder eines Magneten gebracht, bringt er diesen in Bewegung oder kommt selbst in Bewegung; durch eine zusammengesetzte Flüssigkeit gesendet, erzeugt er chemische Zerlegungen und Verbindungen. Diese leichte Umwandlungsfähigkeit der elektrischen Energie ist eines der Hauptmomente, durch welches die Elektrizität sich zu einem maßgebenden Faktor in unserer Kultur entwickelt hat.

Elektrische Ströme zu erzeugen, ist auf verschiedene Weise möglich. In den galvanischen Elementen wird der elektrische Strom durch Umwandelung von c h e m i s c h e r E n e r g i e erzeugt. Bei den Thermoelementen wird der elektrische Strom durch die E n e r g i e d e r W ä r m e gewonnen. In einem geschlossenen Drahtkreis, der in der Nähe eines Magneten oder eines elektrischen Stromes in beliebiger Weise bewegt wird, werden elektrische Ströme, die Induktionsströme erzeugt, und zwar durch Bewegung, also durch Aufwand von B e w e g u n g s e n e r g i e, durch Aufwand von mechanischer Arbeit. Von diesen verschiedenen Erzeugungsweisen elektrischer Ströme ist die letztere für technische Zwecke, bei denen es sich um billige und einfache Erzeugung von Strömen von großer Intensität und oft hoher elektromotorischer Kraft handelt, die einzig zweckmäßige.

Die Anwendung von galvanischen Elementen ist zur Erzeugung von großen Mengen elektrischer Energie eine sehr prekäre. Ein jedes Element erfordert eine sorgfältige Behandlung, öfteren Wechsel der Flüssigkeiten und Metalle. Eine große Anzahl von Elementen nimmt

einen großen Raum ein. Außerdem entwickeln die galvanischen Elemente zum Teil, und gerade die stärkeren, schädliche und unangenehme Dämpfe. Und endlich ist die Anwendung der Elemente eine sehr teure. In fast allen Elementen wird durch chemische Prozesse Zink in Säuren aufgelöst, der elektrische Strom wird also nur erhalten durch Oxydation (Verbrennung) von Zink, einem sehr teuren Brennmaterial. Aus allen diesen Gründen scheiterten alle Versuche, die mit solchen Batterieen für technische Zwecke angestellt wurden.

Die prinzipiell vorteilhafteste Methode, um elektrische Ströme zu erzeugen, wäre die, direkt die Wärme in Elektrizität umzuwandeln. Aber leider ist eine auch tatsächlich vorteilhafte Methode dafür bisher nicht gefunden worden. Die Thermoelektrizität, die bisher allein in dieser Beziehung in Frage kommt, liefert, selbst bei den vorteilhaftesten Konstruktionen, nur eine sehr geringe Ausnutzung der Wärme, so daß die größeren Thermosäulen zwar für geringe Bedürfnisse nach Elektrizität zweckmäßig sind, wo es mehr auf Bequemlichkeit der Anwendung als auf vorteilhafte Erzeugung ankommt, für große technische Betriebe aber nicht in Frage kommen.

Das wirksamste Mittel dagegen zur einfachen Erzeugung von elektrischen Strömen hoher Energie bietet die Induktion, und insbesondere die Induktion durch Magnete, die sogenannte Magnetoinduktion.

Von einem Magneten gehen nach allen Richtungen Kräfte aus, welche gewisse Wirkungen ausüben. Wir können uns diese Kräfte bildlich versinnlichen, indem wir sie durch Kraftlinien darstellen, die von dem Nordpol ausgehen, durch die Luft oder andere Körper zum Südpol sich hinbiegen und dann gedrängt durch das Eisen des Magnets vom Südpol zum Nordpol verlaufen. Diese Kraftlinien machen weiches, unmagnetisches Eisen, in welches sie eintreten, selbst magnetisch, sie induzieren, wie man es nennt, Magnetismus in dem Eisen. Die Kraftlinien verschiedener, einander nahe gebrachter Magnete stauen sich, wenn sie sich entgegen laufen, und verschmelzen, wenn sie nach derselben Richtung gehen, und erzeugen dadurch Bewegung der Magnete selbst.

Aber diese Kraftlinien, die von einem Magneten ausgehen, wirken nicht bloß auf Eisen magnetisierend und bewegend. Sie erzeugen auch in gewissen Fällen elektrische Ströme. Sobald man einen Drahtkreis, am besten eine Drahtspule, in der Nähe eines solchen Magneten irgendwie bewegt, so werden, wie im ersten Abschnitt ausführlich beschrieben wurde, in dem Drahtkreis, in der Drahtspule momentane Induktionsströme erregt. Die Zahl der Kraftlinien, die in einer Sekunde von der bewegten Spule senkrecht geschnitten werden, entspricht der elektromotorischen Kraft des Induktionsstromes. Vorteilhaft ist es, in die Spule noch einen Kern von weichem Eisen zu bringen, da dieser in der Nähe des Magneten selbst magnetisch wird, und zwar bei der Bewegung bald stärker und bald schwächer. Diese Veränderung der Stärke des Magnetismus erzeugt aber selbst ebenfalls in der umgebenden Drahtspule Veränderungen der Kraftlinienzahl und daher kräftigere Induktionsströme.

Welche Form man den beweglichen Drahtspulen mit ihren Eisenkernen gibt, ist zunächst gleichgültig. Man kann flache Kerne mit Draht

umwickeln, man kann lange Eisenzylinder entweder der Quere nach oder der Länge nach mit Drahtwindungen umgeben, man kann endlich eiserne Ringe ganz mit Draht umwinden, in jedem Falle werden Induktionsströme entstehen, wenn diese Spulen mit ihren Kernen in der Nähe von Magneten bewegt werden. Nur wird natürlich je nach der Anordnung die Induktion bald stärker, bald schwächer sein. Im allgemeinen wird man selbstverständlich darauf sehen müssen, daß der zu induzierende Draht sich in möglichst starken magnetischen Feldern bewegt.

Sehr bald nach der Entdeckung der Induktionsströme durch Faraday, schon wenige Jahre nachher, konstruierte Pixii bereits die erste Maschine, welche durch Drehung von Drahtspulen mit Eisenkernen vor Magneten fortdauernde Induktionsströme erzeugte. Er ließ dabei, aus Konstruktionsgründen, nicht die Spulen mit ihrem Eisenkern rotieren und den Magneten feststehen, sondern er stellte im Gegenteil den Eisenkern mit den Spulen fest und brachte einen Hufeisenmagneten um seine Achse in Rotation. Der Effekt auf die Spulen war natürlich derselbe.

Solche Maschinen, die durch Bewegung von Drahtspulen gegen Magnete (oder umgekehrt) Ströme erzeugen, nennt man magnetelektrische Maschinen. Man nennt bei ihnen den Magneten, welcher die Ströme induziert, den induzierenden Magnet oder auch den Feldmagnet, die Drahtspulen mit ihrem Eisenkern bezeichnet man als Induktor oder Anker oder Armatur.

Pixii ließ also den Anker feststehen und den Feldmagneten rotieren aus dem Grunde, weil es dadurch ohne Schwierigkeit möglich war, die Ströme aus den Ankerspulen, die ja dabei fest blieben, mit einem äußeren Stromkreis zu verbinden.

Will man umgekehrt den Magneten feststehen lassen und die Spulen bewegen, so muß man eine Einrichtung treffen, daß der äußere Stromkreis, in welchen man die erzeugten Induktionsströme schicken will, ohne sich mitzubewegen doch in beständigem Kontakt mit dem sich drehenden Induktor bleibt. Dies erreicht man dadurch, daß man die Enden der Spule des Induktors an die Drehungsachse führt und dort jedes Ende an je einen Metallring befestigt, die voneinander und von der Achse isoliert sind. Diese beiden Ringe bilden also die beiden Enden der Spule und an sie wird durch schleifende Kontakte der äußere Schließungskreis angelegt. Man läßt nämlich Bürsten aus Kupferdraht oder auch aus Kohle auf diesen Ringen schleifen und durch diese den Strom von der Maschine in den äußeren Schließungskreis führen.

Läßt man eine Drahtspule sich abwechselnd vor einem Nordpol und einem Südpol vorbeibewegen, so erhält man zunächst in der Spule immer Wechselströme.

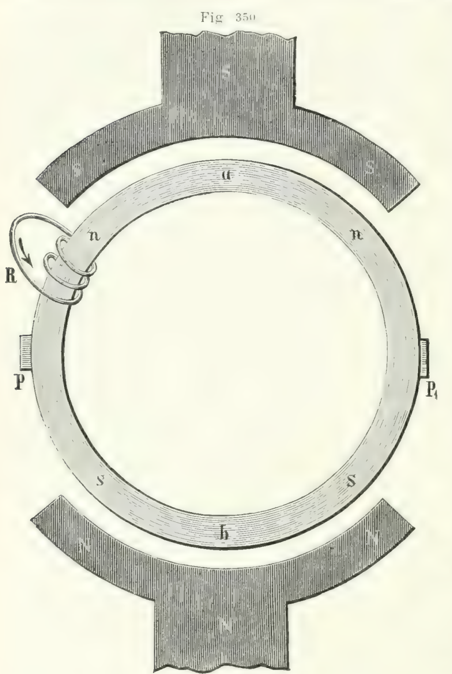
Man kann aber auch, was auf den ersten Blick sonderbar erscheint, die Drähte des Ankers so anordnen, daß man durch Induktion nicht Wechselströme, sondern Gleichströme erzeugt.

Es war zuerst ein Italiener, Pacinotti, dem dies gelang. Pacinotti nahm nämlich als Eisenkern einen geschlossenen eisernen Ring und umwickelte diesen vollständig mit Draht. Die Enden dieses Drahtes lötete er aneinander, so daß der Draht vollkommen geschlossen war und

keine freien Enden mehr hatte. Ein solcher Induktor, den man oft den Pacinottischen Ring, gewöhnlich aber den Grammeschen Ring nennt, weil er durch Gramme erst allgemein bekannt wurde, ein solcher Induktor zeigt nun merkwürdige, aber leicht zu übersehende Erscheinungen, wenn man ihn vor den Polen eines Magneten rotieren läßt, Eigenschaften, die wir aus einer Betrachtung der Fig. 350 leicht erkennen können.

Der Ring ist fortlaufend mit Draht umwickelt, wie es die drei gezeichneten Drahtwindungen R andeuten, und befindet sich zwischen den Polen S und N eines kräftigen Hufeisenmagneten, der mit Polschuhen versehen ist, welche den Ring zum Teil umfassen. In dem Ring von weichem Eisen wird nun durch den südmagnetischen Polschuh SS an den ihm gegenüberliegenden Stellen Nordmagnetismus n n induziert, und durch den nordmagnetischen Polschuh NN entsprechend Südmagnetismus s s. Wenn der Ring rotiert, so kommen stets neue und neue Eisenteilchen gegenüber von NN und SS und stets werden an diesen Stellen die Pole s und n erzeugt. Ist der Ring von ganz weichem Eisen, so verliert jedes Teilchen seinen Magnetismus bald, sowie es aus der Nähe des induzierenden Polschuhes sich entfernt hat. Es ist also stets dem Polschuh NN gegenüber der Ring südmagnetisch, dem Polschuh SS gegenüber nordmagnetisch. Dadurch, daß der Eisenring rotiert, wird daran nichts geändert. Der Ring ist nun mit Draht fest umwickelt. Wir können daher die Erscheinungen auch vollkommen untersuchen, wenn wir annehmen, daß der eiserne Kern nicht rotiert, sondern ganz fest bleibt, und daß nur die Drahtwindungen um den Eisenkern herumlaufen.

Fig. 350



In der beweglichen Rolle R entstehen nun Induktionsströme und zwar durch die einwirkenden Magnete in Verbindung mit dem magnetisch gewordenen Eisenkern. Wir können die Richtung dieser Induktions-

ströme am bequemsten aus der Rechten-Hand-Regel (S. 215) ermitteln.

In der oberen Hälfte der Figur von p bis p_1 ist ein magnetisches Feld vorhanden, das gebildet wird von dem südmagnetischen Polschuhe und dem nordmagnetisch gewordenen Eisenkern. Die Kraftlinien haben also in der oberen Hälfte der Figur die Richtung von dem Ringe zum Polschuh. In diesem Felde bewegt sich nun die Spule, indem sie bei der Bewegung ihre Fläche dreht von der horizontalen Lage in p bis zur vertikalen Lage in a und in demselben Sinne weiter bis zur horizontalen Lage in p_1. Auf diesem ganzen Wege haben wir also immer den Zeigefinger der rechten Hand nach oben, den Daumen nach rechts zu halten, folglich hat der entstehende Induktionsstrom die Richtung des rechten Mittelfingers, ist also nach vorn gerichtet, wie es der Pfeil in der Rolle R angibt. Der auf dem Wege von p über a nach p_1 entstehende Induktionsstrom hat also immer dieselbe Richtung in der Spule, wobei er an Stärke von p bis a zunimmt und dann wieder abnimmt. Bei der weiteren Bewegung von p_1 nach unten kommt die Spule in ein magnetisches Feld, in welchem der Nordpol außerhalb der Spule, der Südpol innerhalb derselben ist. Der Zeigefinger hat noch dieselbe Richtung. Da aber jetzt die Bewegung von rechts nach links, statt von links nach rechts geht, der rechte Daumen also in die entgegengesetzte Richtung zeigt, so ist auch die Richtung des Stromes auf dieser Hälfte die entgegengesetzte und bleibt so von p_1 über b bis p, wobei die Stärke des Stromes zunimmt von p_1 bis b und dann abnimmt von b bis p. In der Mitte zwischen den beiden Ringhälften, an den Stellen p und p_1, muß also der Strom in der Spule seine Richtung ändern, also durch die Stromstärke Null hindurchgehen, d. h. wenn die Spule an den Punkt p oder p_1 gekommen ist, so fließt kein Strom in ihr.

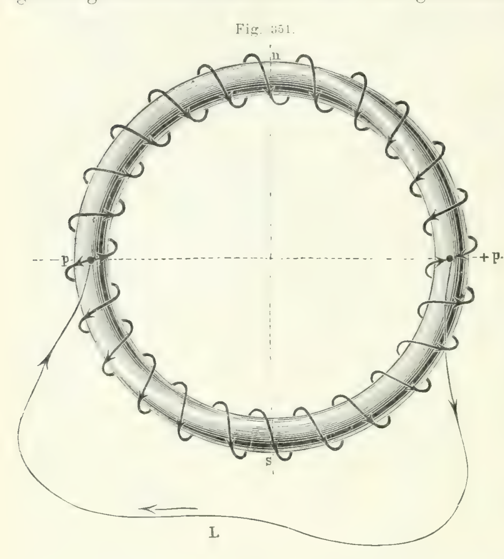
So wird also eine Rolle R bei ihrem Umlauf um den eisernen Ring der Reihe nach an zwei Punkten p und p_1 stromlos, aber sonst in den beiden Hälften des Ringes stets von Strömen durchflossen sein. Die Stellen, an denen die Spule stromlos ist, bezeichnet man als die neutrale Zone.

Nehmen wir nun an, daß der ganze Ring mit solchen Rollen umgeben ist, wie es in Fig. 351 durch eine Reihe von Drahtwindungen angedeutet ist, welche einen geschlossenen Kreis um den ganzen Ring bilden. Wenn diese ganze Drahtumwickelung um den Eisenring herumläuft, so haben stets die in der oberen Hälfte des Ringes induzierten Ströme die entgegengesetzte Richtung wie in der unteren. An den Stellen + p und — p kommen diese entgegengesetzten Ströme zusammen. Da nun der Draht ein in sich vollkommen geschlossener ist, so müssen sich diese entgegengesetzt gerichteten Ströme in dem Draht vollkommen aufheben, es fließt dann in der Umwickelung des Ringes gar kein Strom. Von allen oben befindlichen Windungen fließt der positive Strom nach + p hin (also von — p weg) und ebenso von allen unten befindlichen Windungen.

Man kann aber diese Stromkombination noch in anderer Weise ansehen. Man kann die Stellen + p und — p so auffassen, wie aus den Pfeilen in der Figur deutlich wird, als ob von beiden Hälften des Ringes nach + p fortwährend positive Elektrizität hinströmt, von — p dagegen

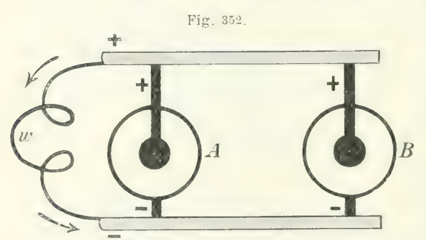
fortwährend positive wegströmt. Dann lassen sich die beiden Drahthälften auffassen als zwei galvanische Elemente, welche je an — p ihren negativen Pol und an + p ihren positiven Pol haben. Verbindet man zwei gleiche galvanische Elemente so mit ihren gleichnamigen Polen, so heben sich die Ströme in ihnen auf. Man kann aber andererseits, wie es bei dem Parallelschalten von zwei Elementen geschieht, die beiden miteinander verbundenen positiven Pole und ebenso die beiden miteinander verbundenen negativen Pole zusammen durch einen äußeren Verbindungsdraht schließen. Dann fließt in dem äußeren Draht der Strom von dem einen Polpaar zum anderen.

Fig. 351.



Eine solche Verbindung zeigt Fig. 352. In dieser sind A und B die beiden parallelgeschalteten Elemente und w ist der äußere Schließungskreis, in welchem also die Elektrizität in der Richtung der Pfeile fließt. Ganz dasselbe kann man bei dem Grammeschen Ring machen. Sobald man die Stellen + p und — p durch den äußeren Schließungsdraht L in Fig. 351 verbindet, fließt der positive Strom fortwährend in diesem in der Richtung der Pfeile.

Fig. 352.

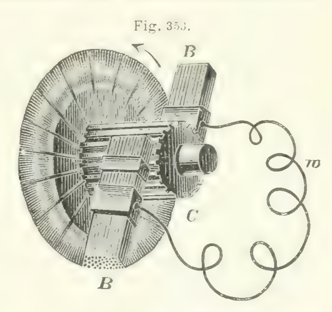


So hat man also ein einfaches Mittel, um in dem äußeren Schließungsdraht einen Strom von gleichbleibender Richtung zu erzeugen, einen Strom, der durch kontinuierliche Rotation eines mit Draht umwickelten Eisenringes entsteht.

Bei der wirklichen Ausführung eines solchen Ringes bildete nun Gramme, wie Fig. 353 zeigt, die Umwickelung des Ringes aus einer großen Anzahl von einzelnen Drahtspulen, deren Enden er an die Achse

führte und dort in Kupferstreifen ausgehen ließ. Die Kupferstreifen sind dann alle voneinander isoliert und ein jeder bildet die Verbindung zwischen dem Ende der einen und dem Anfang der benachbarten Spule. Es sind also ebensoviele Kupferstreifen vorhanden wie einzelne Spulen, und die Spulen sind alle hintereinander verbunden, so daß sie eine vollständig gleichlaufende Umwickelung des Eisenringes bilden. An denjenigen beiden Kupferstreifen, welche den Stellen + p und — p entsprechen, welche also zunächst senkrecht zu der Verbindungslinie der Magnetpole stehen, schleifen Bürsten B B, welche von ihnen den Strom abnehmen und in die äußere Leitung w senden. Den auf der Achse sitzenden Teil C, der aus einer Anzahl Kupferstreifen und dazwischen liegenden isolierenden Glimmerstreifen besteht, nennt man den Kollektor (Stromsammler), auch wohl Kommutator, obwohl er kein eigentlicher Stromwender ist. Daß der Ring aus einer großen Zahl von einzelnen Spulen gebildet wird, die durch die Streifen des Kollektors je miteinander verbunden sind, hat folgenden Zweck. Nehmen wir an, es sei die ganze eine Hälfte des Ringes fortlaufend mit Draht umwickelt und die ganze andere Hälfte auch, und die zwei Enden jeder dieser Bewickelungen würden zu je einem Streifen auf dem Kollektor geführt, so würden die Bürsten auch, sobald die Streifen bei der Drehung bei ihnen vorbeipassieren, den Strom von ihnen abnehmen und in die äußere Leitung führen. Aber man sieht, daß dann eine sehr lange Unterbrechung des Stromes entstehen würde. Nur nach je einer halben Umdrehung des Ringes würde wieder ein Strom in die äußere Leitung geschickt werden. Je mehr Spulen vorhanden sind, je mehr Abteilungen der Kollektor besitzt, desto rascher folgen also die einzelnen gleichgerichteten Ströme in der äußeren Leitung aufeinander, desto mehr wird also der Strom zu einem kontinuierlichen.

Fig. 353.



Wenn aber nun bei der Rotation in den Umwindungen des Ringes und in dem äußeren Stromkreis ein Strom fließt, so tritt dadurch sofort eine Änderung in den eben betrachteten Verhältnissen ein. Die in den Drähten des Ringes, den sogenannten Ankerwindungen, fließenden Ströme üben ja selbst wieder für sich magnetische Kräfte aus und suchen den Eisenring für sich zu magnetisieren. Und zwar erzeugen sie, wie man aus der Ampèreschen Schwimmerregel (S. 162) erkennt, einen Nordpol und einen Südpol an den Stellen p_1 und p der Fig. 350, während der äußere Magnet an den Stellen n und s die Pole erzeugt. Diese beiden magnetisierenden Kräfte, die senkrecht aufeinander wirken, setzen sich zusammen und bewirken, daß in dem Ring die beiden Pole etwas in der Richtung der Drehung verschoben sind. Daraus folgt, daß unter dem Einfluß dieser magnetischen Wirkungen des Ankerstromes, durch die Ankerrückwirkung, auch die neutrale Zone nicht mehr genau senkrecht zu den ursprünglichen Kraftlinien liegen bleibt, bei p und p_1,

sondern ebenfalls um einen bestimmten Winkel in der Richtung der Bewegung des Ringes gedreht ist. Es verschiebt sich also durch die Ankerrückwirkung die neutrale Zone des Ringes, an der der Strom sich umkehrt, etwas in der Richtung der Bewegung, und man darf deshalb die Drahtbürsten nicht direkt senkrecht zur Verbindungslinie der induzierenden Pole stellen, sondern muß sie etwas in Richtung der Drehung verschieben. Wie weit sie zu verschieben sind, das hängt von dem Verhältnis der Stärke der direkten magnetischen Wirkung der induzierenden Magnete und der Stärke der Ankerrückwirkung ab, ist also bei verschiedenen Stromstärken verschieden.

Durch Anwendung eines solchen Ringes als Induktor ist es also nun möglich, direkt Induktionsströme von konstant bleibender, unveränderlicher Richtung, also Gleichströme, zu erhalten.

Die Erfindung des Grammeschen Ringes war das eine wesentliche Moment, welches den Aufschwung der Elektrotechnik hervorgerufen hat.

Ein zweites aber, das wesentlichste Moment, bestand in folgendem. Als Feldmagnete für eine solche Maschine nimmt man natürlich im allgemeinen Elektromagnete wegen ihres starken Magnetismus. Aber hier trat nun sofort folgende wichtige Frage auf: Um diese Elektromagnete zu erzeugen, braucht man einen Strom, der eben um die Eisenkerne der Feldmagnete herumfließt. Muß man nun diesen Strom aus irgend einer äußeren Quelle nehmen, z. B. aus einer Batterie, oder kann man den Strom, der im Induktor entsteht, selbst zur Magnetisierung der Feldmagnete benutzen?

Schon die Stellung dieser Frage war eine bedeutende und prinzipiell höchst wichtige Tat. Und der Fortschritt, der in der Stellung und Lösung dieser Frage liegt, ist eine der größten Errungenschaften, welche die Technik dem Genie von Werner Siemens zu danken hat, der im Jahre 1867 diese Frage aufwarf und zugleich löste.

Siemens sagte sich, daß es gewiß nicht nötig sei, die Elektromagnete durch einen fremden Strom, etwa von einer Batterie, erregen zu lassen, sondern daß man diese durch den Strom der eigentlichen Maschine selbst erregen lassen könne. Wenn einmal in einem Induktor ein Gleichstrom erzeugt sei, so brauche man diesen ja bloß in Spiralwindungen um die Magnete passend herumzuführen, um die Stärke dieser Magnete erheblich zu vergrößern. Oder noch mehr, da jedes Stück Eisen durch den Erdmagnetismus schon ein wenig magnetisch ist, so braucht man als induzierenden Körper nur ein hufeisenartig geformtes Stück weichen Eisens zu nehmen und um dieses den Strom aus dem Induktor herumzuführen, um es zu einem kräftigen Magneten zu machen und dadurch den Strom aus dem Induktor erheblich zu verstärken. Dies ist das berühmte Dynamoprinzip von Siemens und nach diesem Prinzip, entweder in direkter oder in modifizierter Anwendung, werden sämtliche neuen Maschinen gebaut. Es ist also bei diesen Maschinen von vornherein gar kein eigentlicher Magnet vorhanden; der schwache remanente Magnetismus jedes Eisenkerns leitet die Wirkung ein und erst durch den Gang der Maschine werden die Magnete erzeugt und beeinflussen dann in der erheblichsten Weise die Wirksamkeit der Maschine. Aus

diesem Grunde, weil der Magnetismus gewissermaßen nur als Zwischenprodukt auftritt, um die Verwandelung der aufgewendeten Arbeit in Elektrizität zu vermitteln, nannte Siemens diese Maschinen Dynamomaschinen von δύναμις, dynamis, Arbeit, oder auch dynamoelektrische Maschinen. Bei einer solchen Maschine wird also zunächst der schwache, remanente Magnetismus, den jedes, auch das weichste Eisen, zurückbehält, benutzt, um bei der Drehung des Ankers zuerst einen schwachen Strom in ihm zu erzeugen. Dieser fließt nun um die Eisenkerne in passender Richtung, macht sie also zu Magneten, wenn auch schwachen, und wird nun dadurch selbst wieder verstärkt. So verstärkt der Strom fortwährend den Magnetismus, der Magnetismus fortwährend den Strom, bis schließlich die Magnete zum Maximum magnetisiert sind und so die höchste Wirksamkeit der Maschine erreicht ist. Technische Konstruktionen sind immer genial und hervorragend leistungsfähig, wenn sie es verstehen, Anordnungen zu treffen, durch welche Ursache und Wirkung sich gegenseitig verstärken. Das ist eben gerade der Fall bei der Dynamomaschine, das ist auch bei der Influenzmaschine und der Luftverflüssigungsmaschine von Linde der Fall, um nur einige solcher Konstruktionen zu nennen.

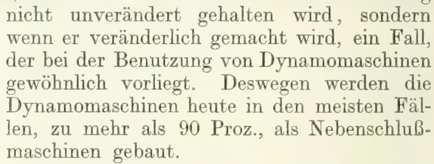
Fig. 354.

Das Schema einer derartigen Dynamomaschine, wie sie nach diesem Prinzip angeordnet ist, ist in Fig. 354 gezeichnet. Man sieht dabei einen Elektromagneten M, der hufeisenförmig gestaltet ist und zwischen seinen Polschuhen den Ring R trägt. Dessen Kommutator ist nicht besonders gezeichnet, sondern die Bürsten a und b schleifen in der Figur direkt auf dem Ring. Der äußere Stromkreis, durch den der bei der Drehung des Ringes erzeugte Strom fließt, ist mit w bezeichnet. Der Strom fließt der Reihe nach von den Drähten des Ankers R durch die Bürste a um die Windungen der beiden Elektromagnetschenkel M herum zur einen Polklemme K_2, von dieser durch den äußeren Schließungskreis w zur anderen Polklemme K_1 und durch die Bürste b in den Anker zurück. Anker, Elektromagnet, äußerer Schließungsdraht bilden also einen einzigen unverzweigten Stromkreis, sie sind hintereinander geschaltet. Dabei sind übrigens stets die beiden Hälften der Ankerwindungen einander parallel geschaltet, so daß in jeder Hälfte nur ein Strom von der halben Stärke des äußeren Stromes fließt. Solche Maschinen nennt man Hauptstrommaschinen.

Man kann aber das Dynamoprinzip auch in anderer Weise anwenden. Man kann nämlich den Strom, der von den Ankerdrähten kommt, direkt in die äußere Leitung führen und um die Magnete herum nur einen Zweigstrom senden. Eine solche Anordnung zeigt das Schema in Fig. 355.

Hier teilt sich der Strom, der durch die Bürsten a und b aus dem Anker R kommt, bei m und n und geht zum Teil durch den äußeren Schließungskreis w, zum Teil aber in vielen Windungen um die Magnete M. Man bezeichnet Maschinen mit dieser Anordnung als *Nebenschlußmaschinen*. In die Magnetbewickelung wird gewöhnlich noch ein variabler Widerstand S (ein Regulierwiderstand) eingeschaltet, um die Stärke des Magnetstromes passend zu verändern. Seine Einrichtung ist aus der Figur selbst klar. Diese Schaltung ist eine sehr vorteilhafte, sie ist namentlich dann von großem Wert, wenn der Widerstand der äußeren Leitung nicht unverändert gehalten wird, sondern wenn er veränderlich gemacht wird, ein Fall, der bei der Benutzung von Dynamomaschinen gewöhnlich vorliegt. Deswegen werden die Dynamomaschinen heute in den meisten Fällen, zu mehr als 90 Proz., als Nebenschlußmaschinen gebaut.

Fig. 355.



Eine dritte Schaltung, die in manchen Fällen mit Vorteil angewendet wird, ist die sogenannte *Compoundschaltung*. Diese besteht darin, daß man die Magnete sowohl durch den Hauptstrom als durch einen Zweigstrom erregen läßt. So gebaute Maschinen nennt man *Compoundmaschinen*. Ihr Schema ist in Fig. 356 gezeichnet. Von dem Ring R geht durch die Bürsten der Hauptstrom (stark gezeichnet) um die Magnete M und durch den äußeren Widerstand w; außerdem aber zweigt sich bei a und b der schwach gezeichnete Nebenstrom ab und fließt in vielen Windungen allein um die Magnete. Welchen Vorteil diese Schaltung gewährt, wird später klar werden.

Selbstverständlich kann man auch die Magnete einer Dynamomaschine statt durch ihren eigenen Strom durch den Strom einer anderen Maschine erregen lassen. Man bezeichnet sie dann als Dynamomaschine mit *Fremderregung*, im Gegensatz zu den eigentlichen Dynamomaschinen, die man als Maschinen mit *Eigenerregung* bezeichnet.

Der Grammesche Ring gab zum erstenmal eine Form des Ankers, bei welcher man ohne einen eigentlichen Kommutator Gleichströme aus einer magnetelektrischen oder Dynamomaschine entnehmen konnte. Zugleich bietet die Form des Ringes die Möglichkeit, die Drahtwindungen sehr nahe an den Polen der Feldmagnete rotieren zu lassen und dadurch sehr starke Induktionen zu erzielen. Aber die Ringform hat auch einen großen Nachteil. Die Teile der Drähte, welche im Innern des Ringes sich befinden, werden nicht induziert, sie tragen also zur Erzeugung des Stromes nichts bei, sondern bilden nur nutzlosen Widerstand. Außerdem ist ein

Ring nur mühsam und schwierig mit Draht zu umwickeln. Deswegen suchte man andere Formen des Ankers zu ersinnen, welche die Vorzüge des Ringes, ohne seine Nachteile, besitzen, welche aber vor allem ebenfalls direkt ohne Kommutator Gleichströme abzunehmen gestatten sollten, und in der Tat fand bald darauf Hefner-Alteneck, daß man die Drähte auch auf einen Zylinder so aufwickeln kann, daß sie sich ebenso in zwei Hälften parallel schalten lassen wie bei dem Ring.

Der Anker, welchen Hefner-Alteneck konstruierte, ist also ein eiserner Zylinder und wird Trommelanker genannt. Der aufgewickelte Draht ist wieder wie beim Ringanker in eine Reihe von Spulen geteilt. Jede Spule ist über den Zylindermantel der Länge nach gelegt, so daß sie über die eine Endfläche des Zylinders herum geht. An der anderen Endfläche befindet sich auf der Achse des Zylinders wieder der Kollektor, an welchem die Verbindungen der einzelnen Spulen vorgenommen werden.

Fig. 356.

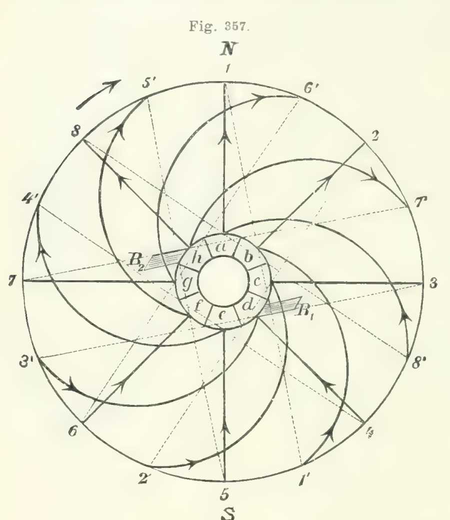
Die Drahtverbindungen kann man dabei noch auf verschiedenfache Weise ausführen. Am übersichtlichsten und einfachsten ist die Verbindung, welche durch Fig. 357 dargestellt ist. In dieser betrachten wir die Trommel von vorn, vom Kollektor aus, und nehmen an, daß 8 Drähte auf ihr aufgewickelt sind. Da jeder von den 8 Drähten zweimal der Länge nach auf dem Zylinder liegt, so ist der Zylindermantel von 16 Drähten belegt. Durch die mit den Zahlen 1, 2 . . . 8, 1′, 2′ . . . 8′ bezeichneten Punkte sind die Stellen angegeben, wo diese 16 Drähte vorn auf der Kollektorseite der Trommel, der Stirnfläche, liegen. Dabei gehören 1 u. 1′ zu einem zusammenhängenden Draht, ebenso 2 u. 2′ u. s. f. Wie die Drähte vorn auf der Stirnfläche laufen, ist dabei durch die ausgezeichneten Linien, wie sie auf der Rückfläche der Trommel laufen, durch punktierte Linien angegeben. Da 8 verschiedene Drähte vorhanden sein sollen, so muß der Kollektor aus 8 Teilen, a, b, c . . . bis h bestehen. Wir nehmen an, daß oberhalb der Trommel ein Nordpol (als Polschuh ausgebildet, der einen großen Teil der Trommel umfaßt), unterhalb ein Südpol sich befinde, und daß die Trommel sich nach rechts, wie ein Uhrzeiger, dreht. Dann fließen (nach der Rechten-Hand-Regel) in der oberen Hälfte der Figur auf der Trommel die Ströme von der Stirnfläche zur Rückfläche, unten umgekehrt von der Rückfläche zur Stirnfläche.

Nun teilen wir zuerst den Umfang der Stirnfläche in 8 Teile ein und bezeichnen die entsprechenden Punkte der Figur mit 1, 2 . . . bis 8. Da hier, bei einer geraden Zahl der Drähte, der Punkt 5 dem Punkt 1 gerade gegenüberliegt, so können wir das andere Ende des Drahtes 1,

welches mit 1' bezeichnet ist, nicht nach 5 legen, können also den Draht nicht genau diametral um die Trommel legen, sondern müssen es nach rechts oder links von 5 verlegen. In der Figur ist es nach rechts verlegt an den Punkt 1'. Von dort aus folgen sich dann in den Mitten der vorher bestimmten Abteilungen die Punkte 2', 3' . . . bis 8'.

Und nun sieht man, daß die Schaltung eine sehr einfache ist. Vom Kollektorstück a ausgehend, gehen wir auf der Stirnseite bis 1, dann oben auf der Trommel entlang, dann auf der Rückseite der Trommel schief nach unten, so daß wir auf der Unterseite der Trommel nach 1' kommen. Dieses Ende 1' muß nun einfach zu dem folgenden Kollektorsegment b führen. Von dort geht dann der zweite Draht 2 aus, der nach 2' kommt und dann mit c verbunden wird und so fort, bis das letzte Ende 8' wieder mit a verbunden ist. Verfolgt man mittels der Pfeile die Stromrichtung in den Drähten, so sieht man, daß zum Kollektorstück d zwei Drähte kommen (nämlich von 4 und 3'), die beide den Strom zu ihm hinführen, zum Kollektorstück h zwei Drähte (nämlich von 8 und 7'), die beide den Strom von ihm fortführen. An diese beiden Stellen müssen also die Bürsten B_1 und B_2 angelegt werden.

Fig. 357.



Der Trommelanker hat den Vorzug, daß bei ihm fast der ganze Draht, mit Ausnahme des kleinen Teils auf der Stirnfläche und Rückfläche, wirklich zur Erzeugung des Stromes ausgenutzt wird. Die Wickelung der Drähte auf die Trommel ist zwar schwierig, sie läßt sich aber vorher in Schablonen ausführen, die nachher einfach auf die Trommel geschoben werden. Zugleich wird bei ihr die ganze Eisenmasse der Trommel magnetisch ausgenutzt, so daß die Dynamomaschinen jetzt fast nur noch mit Trommelanker, nicht mit Ringanker ausgeführt werden. Der Grammesche Ring ist bereits eine nur historische Konstruktion geworden.

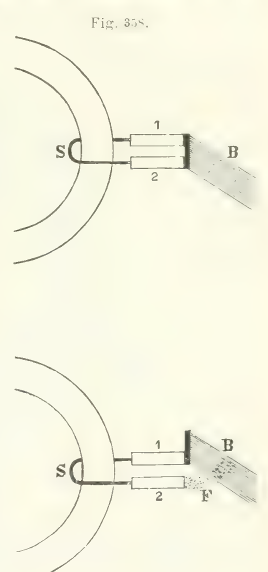
Bevor wir nun näher auf die Konstruktion der einzelnen Maschinen eingehen, ist es zuerst notwendig, einige allgemeine Verhältnisse der Dynamomaschinen zu erörtern.

Wenn der Anker der Dynamomaschine in dem Feld der Magnetschenkel rotiert, so werden nicht bloß in der Drahtumwickelung, sondern auch in dem Eisen des Ankers selbst Induktions-

ströme, die sogenannten Foucaultschen Ströme oder Wirbelströme (S. 224), erregt. Diese sind nun dem Betrieb der Maschine in jeder Hinsicht schädlich; denn erstens erfordern sie zu ihrer Erzeugung Aufwand von Arbeit und zweitens setzen sie sich, da sie in den metallischen Leitern fließen, in Wärme um und erhitzen daher den Eisenanker sehr beträchtlich. Es ist also Aufgabe der Konstruktion, das Zustandekommen dieser Ströme möglichst zu verhindern.

Diese Induktionsströme fließen nun immer in der Richtung der größten Induktion, und da man natürlich in dieselbe Richtung auch die Drähte legt, die induziert werden sollen, so fließen die Foucaultschen Ströme immer parallel zu den um den Anker gelegten Drähten. Wenn man daher den metallischen Zusammenhang des Eisenankers in der Richtung dieser Foucaultschen Ströme unterbricht, so wird das Zustandekommen derselben gehindert werden. Aus diesem Grunde wird der Eisenkern des Ankers nie massiv gemacht, sondern immer zerteilt, d. h. aus gefirnißten Eisendrähten oder aus gefirnißten Eisenblechen gebildet. Bei dem Ringanker wird also der Eisenkern aus einem Bündel von ringförmig gebogenen Drähten gebildet, die alle senkrecht zur Drehungsachse liegen, in der Richtung der Induktionsströme also keinen metallischen Zusammenhang miteinander haben. Ebenso wird der Eisenzylinder beim Trommelanker aus lauter Eisenscheiben zusammengesetzt, die in der Richtung der Achse keinen metallischen Zusammenhang besitzen. Damit ist eine Hauptquelle für Arbeitsverluste beseitigt.

Fig. 358.



Bei der Drehung des Ankers kommt weiter jede Spule abwechselnd einmal aus der oberen Hälfte des Feldes in die untere. Dabei kehrt sich der Strom in ihr um, indem er durch Null hindurchgeht. Bei dieser Umkehrung des Stromes werden aber Extraströme in der betreffenden Spule selbst und dadurch auch Induktionsströme in den benachbarten Spulen hervorgebracht und zwar um so stärkere, je rascher die Stromumkehrung geschieht und je stärker der in den Ringwindungen fließende Strom selbst ist. Der genauere Vorgang hierbei ist folgender. Die beiden Enden jeder Spule sind ja zu zwei aufeinander folgenden Segmenten des Kommutators geführt, wie in Fig. 358 an einer Spule S gezeigt ist, deren Enden die Kommutatorstücke 1 und 2 bilden. Bei der Rotation des Ankers kommt nun für kurze Zeit eine Bürste B mit den beiden aufeinander folgenden Segmenten in Berührung und die betreffende Spule ist dann kurz geschlossen. Sie liegt dann also im Nebenschluß zur Bürste und daher fließt in ihr nur ein Bruchteil des Hauptstroms. Da aber die Spule Selbstinduktion besitzt, so

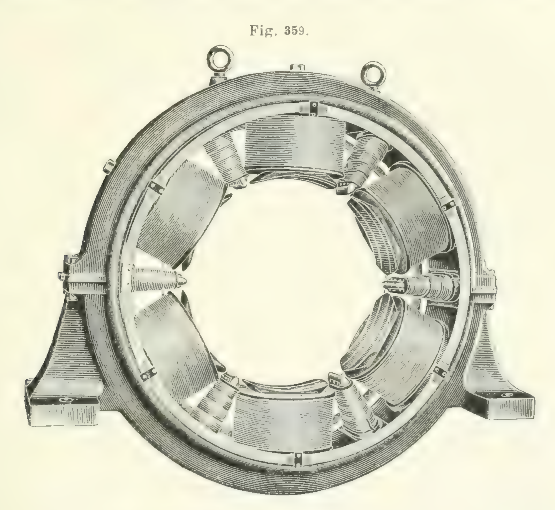
wird durch den raschen Wechsel des Stromes in ihr ein erheblicher Extrastrom erzeugt, der zu so hoher Spannung Veranlassung gibt, daß, wenn die Bürste das Segment 2 verläßt, zwischen ihr und diesem Segment ein starker Funke auftritt. Das wiederholt sich nun beim Gang der Maschine fortwährend bei jeder Spule, die unter den Bürsten vorbeigeht und das Resultat ist, daß zwischen Bürsten und Kollektor fortwährend Funken übergehen, daß die Maschine „feuert", wie man sagt. Es ist eine Hauptaufgabe bei der Konstruktion von Dynamomaschinen, dieses Feuern zu vermeiden. Denn, wenn es nicht beseitigt wird, so entstehen erstens Stromverluste und zweitens tritt eine rasche Zerstörung des Kommutators ein. Es kommt im wesentlichen darauf an, die Intensität dieses Extrastromes im Moment, wo die Bürste von der bis dahin kurzgeschlossenen Spule abläuft, zu verringern. Dazu hilft einerseits schon, wenn man statt der gut leitenden Kupferbürsten Bürsten aus Kohle nimmt, deren Widerstand größer ist. Ein weiteres Mittel besteht häufig in einer einfachen Verschiebung der Bürsten. Wenn man nämlich die Bürste nicht genau an die neutrale Zone legt, sondern noch etwas darüber hinaus in der Richtung der Drehung verschiebt, so erhält infolge der Einwirkung des Magnetfeldes die kurzgeschlossene Spule eine Induktion, die dem Extrastrom entgegenwirkt und ihn daher schwächt. Aber allerdings hilft eine solche bestimmte Verschiebung der Bürsten nur für eine bestimmte Stromstärke im Anker. Ist der Strom, den die Maschine liefern soll, variabel, muß sie bald höhere, bald geringere Stromstärke liefern, so ändert sich dadurch auch die Spannung des erzeugten Extrastromes, während die durch Verschiebung der Bürsten entstehende Induktion dieselbe (wenigstens bei den hauptsächlich gebrauchten Nebenschlußmaschinen) bleibt, also den Extrastrom nicht immer, sondern nur in einem bestimmten Falle kompensieren kann.

Aus dieser Einsicht aber hat sich ein Mittel ergeben, welches das Feuern auch in den unangenehmsten Fällen ganz beseitigen läßt, nämlich in allen den Fällen, in welchen die Maschine sehr stark wechselnde Stromstärken zu liefern hat, oder bei denen die Tourenzahl sich sehr ändert oder dergleichen. Dieses Mittel besteht darin, daß man in der neutralen Zone an dem Magnetgestell der Maschine noch kleine Hilfspole anbringt, die von dem Hauptstrom erregt werden. Dadurch erzeugt man eben an der Kommutierungsstelle eine Induktion, welche der des Extrastroms entgegenwirkt und deren Größe, da die Pole ja vom Hauptstrom erregt werden, immer sich in derselben Weise ändert, wie die des Extrastroms, so daß man durch passende Dimensionierung dieser Hilfspole das Feuern beseitigen kann, ohne die Bürsten aus der neutralen Zone herauszudrehen. Man bezeichnet solche Hilfspole als Wendepole oder Kompensationspole. Da der Hilfspol so wirken soll, wie eine Bürstenverstellung im Sinne der Drehung der Maschine, nur besser, so folgt, daß jeder Hilfspol dasselbe Zeichen haben muß, wie der im Sinne der Drehung der Maschine auf ihn folgende Hauptpol. Wenn n und s die Hilfspole, N und S die Hauptpole einer Maschine sind, so müssen sich also folgen: n, N, s, S. In Fig. 359 ist die Ansicht eines Magnetgestelles mit aufeinander folgenden breiten Hauptpolen und spitzen Hilfs-

polen gegeben. Dieses Gestell gehört zu einer vielpoligen (6poligen) Maschine, von denen wir bald zu sprechen haben werden.

Wenn man den Anker einer durch einen äußeren Stromkreis geschlossenen Maschine mit der Hand oder durch eine Dampfmaschine dreht, so entsteht in dem Anker, in den Drähten der Magnete und in der äußeren Leitung ein kontinuierlicher Strom. Wenn aber ein von einem Strom durchflossener Leiter in der Nähe eines Magneten sich befindet, so übt, wie wir S. 181 gesehen haben, der Magnet auf den Leiter eine Kraft aus und vice versa, und wenn der Leiter beweglich ist, so sucht er sich unter dem Einfluß dieser Kraft zu bewegen. Also durch den Strom selbst, der in dem bewegten Ankerdraht erzeugt ist, entsteht eine innere Kraft in der Maschine, welche den Anker zu bewegen sucht. Und zwar

Fig. 359.



sucht diese innere Kraft den Anker in umgekehrter Richtung zu drehen, als er zur Erzeugung des in ihm fließenden Stromes gedreht wurde. Das wissen wir aus den früheren allgemeinen Erörterungen, nämlich aus dem Lenzschen Gesetz (S. 214), können es aber auch leicht einsehen, wenn wir an die Folgen denken, die eintreten würden, wenn es nicht so wäre. Drehen wir den Anker der Maschine z. B. ein wenig rechts herum, dann fließt ein Strom durch die Ankerdrähte, durch die Elektromagnetwindungen und durch die äußere Leitung in einer bestimmten Richtung. Würde die nun entstehende innere Kraft zwischen dem Magneten und dem Strom den Anker selbst in derselben Richtung zu drehen suchen, so würde der Ring sich von selbst in derselben Richtung weiter drehen, in welcher wir ihn gedreht haben, es würden die Ströme fortwährend weiter fließen und die Maschine sich fortwährend von selbst weiter drehen, während wir ihr

nur eine kleine Bewegung gegeben haben. Es wäre damit das Perpetuum mobile konstruiert, eine Maschine, die nach dem einmaligen Anstoß sich von selbst fortwährend weiter bewegen würde. Ein Perpetuum mobile ist aber nach unseren Naturgesetzen unmöglich. Das Grundgesetz der Natur, das Gesetz von der Erhaltung der Energie, sagt, daß man von keiner Maschine mehr Arbeit gewinnen kann, als man in sie hineingegeben hat, es zeigt also direkt die Unmöglichkeit des Perpetuum mobile. Daraus folgt, daß die innere Kraft, welche die Magnete auf den Strom im Ankerdraht ausüben, den Anker rückwärts zu drehen sucht, entgegengesetzt der Bewegung, welche wir von außen dem Anker erteilten. Diese innere Kraft ist also eine Widerstandskraft; dadurch, daß in der Maschine der Strom fließt, stemmt sich eine Kraft der Bewegung des Ankers entgegen und wir müssen fortwährend von neuem Arbeit aufwenden, um diesen Widerstand zu überwinden. Es wird also direkt mechanische Arbeit mittels der dynamoelektrischen Maschinen in Elektrizität verwandelt. Daß zur Erzeugung von elektrischen Strömen in solchen Maschinen Arbeit, und zwar erhebliche Arbeit, aufzuwenden notwendig ist, kann man auch durch direkte Versuche an jeder kleinen Maschine, die man mit der Hand drehen kann, sofort erkennen. Solange die Klemmen der Maschine nicht durch einen äußeren Draht geschlossen sind, so daß kein Strom fließen kann, läßt sich die Maschine ziemlich leicht in Bewegung setzen und halten. Sowie aber der Stromkreis geschlossen wird, so daß also die Ströme fließen und dadurch die innere Widerstandskraft entsteht, geht die Maschine sehr schwer und man muß erhebliche Arbeit aufwenden, um sie zu drehen.

Betrachten wir weiter die elektromotorische Kraft der erzeugten Ströme und ihre Stärke.

Bei jeder magnetelektrischen und dynamoelektrischen Maschine hängt die elektromotorische Kraft, die durch die Drehung in den Ankerwindungen entsteht, direkt ab von der Zahl der magnetischen Kraftlinien, die in einer Sekunde von allen Drahtwindungen geschnitten werden. Sie hängt also zunächst ab von der Stärke des magnetischen Feldes; je stärker dieses ist, desto größer ist auch die elektromotorische Kraft. Sie hängt ferner davon ab, wie der Eisenkern des Ankers gegen die Pole der Magnete liegt. Je näher der Anker an diesen ist, je besser und kräftiger er magnetisch induziert wird, desto stärker ist die entstehende elektromotorische Kraft. Ferner hängt die elektromotorische Kraft ab von der Drehungsgeschwindigkeit des Ankers. Je rascher der Anker sich dreht, in um so kürzerer Zeit werden die Induktionsströme induziert, um so größer ist ihre elektromotorische Kraft. Bei sonst gleichbleibenden Verhältnissen ist die elektromotorische Kraft einer solchen Maschine direkt proportional der Tourenzahl des Ankers (in einer Minute z. B.). Endlich hängt die elektromotorische Kraft noch wesentlich ab von der Zahl der Windungen auf dem Eisenkern, da in jeder Windung bei dem Schneiden der Kraftlinien eine elektromotorische Kraft induziert wird. Die elektromotorische Kraft wächst direkt mit der Zahl der Windungen auf dem Induktor. Ein Ring, der mit 1000 Windungen versehen ist, gibt unter sonst gleichen Umständen eine doppelt so große elektromotorische Kraft wie ein Ring, der nur mit 500 Windungen versehen ist.

Man hat es daher im allgemeinen bei einer Maschine von bestimmter Form (bestimmtem Typus) in der Hand, durch die Zahl der Ankerwindungen und durch die Tourenzahl, die man verändern kann, jede beliebige elektromotorische Kraft zu erzeugen.

Dabei findet aber nun ein wesentlicher Unterschied zwischen den magnetelektrischen Maschinen oder den Dynamomaschinen mit Fremderregung und den dynamoelektrischen Maschinen mit Eigenerregung statt.

Nehmen wir zuerst magnetelektrische Maschinen oder Dynamomaschinen mit Fremderregung. Bei diesen ist die Stärke der Magnete unveränderlich. Die elektromotorische Kraft hängt also ab von der Stärke der Magnete, der Tourenzahl und der Lage und Windungszahl des Induktors, gar nicht vom äußeren Widerstand. Bei gegebener Konstruktion der Maschine und gegebener Tourenzahl ist die elektromotorische Kraft immer dieselbe, wie groß oder wie klein auch der Widerstand des äußeren Stromkreises sei.

Die elektromotorische Kraft treibt die Elektrizität durch den ganzen äußeren und inneren Stromkreis. Ein Teil dieser elektromotorischen Kraft dient dazu, den inneren, der andere, den äußeren Widerstand zu überwinden. An den Klemmen der Maschine, an welche der äußere Widerstand angelegt wird, herrscht also eine Spannung, welche kleiner ist als die gesamte elektromotorische Kraft, weil sie den Strom eben nur noch durch den äußeren Widerstand zu treiben braucht. Diese Spannung nennt man die Klemmenspannung der Maschine. Erinnern wir uns an den Begriff des Spannungsverlustes, den wir früher eingeführt haben (S. 70). Der Spannungsverlust auf einem Drahtstücke von bestimmtem Widerstand ist immer gleich dem Produkt aus der Stromstärke und diesem Widerstand. Da nun die elektromotorische Kraft der Maschine ganz dazu verbraucht wird, den Strom durch den ganzen inneren und den ganzen äußeren Widerstand zu treiben, so ist die elektromotorische Kraft gleich dem Spannungsverlust auf dem ganzen Wege, also gleich dem Spannungsverlust im inneren und dem Spannungsverlust im äußeren Stromkreis zusammen. Die Klemmenspannung dagegen hat den Strom nur durch den äußeren Stromkreis zu treiben. Sie ist also gleich dem Spannungsverlust im äußeren Stromkreis allein. Daraus folgt, daß die Klemmenspannung um so viel kleiner ist als die elektromotorische Kraft, als der Spannungsverlust im Innern der Maschine selbst beträgt.

Elektromotorische Kraft = Klemmenspannung + innerer Spannungsverlust.

Bei einer magnetelektrischen Maschine ist nun zwar die gesamte elektromotorische Kraft, aber nicht die Klemmenspannung unabhängig vom äußeren Widerstande. Ist die Maschine ungeschlossen, also der äußere Widerstand zwischen den Klemmen unendlich groß, so ist die Klemmenspannung gleich der elektromotorischen Kraft. Denn da bei ungeschlossener Maschine überhaupt kein Strom fließt, so ist der Spannungsverlust im Innern der Maschine gleich Null. Sind dagegen die beiden Klemmen durch einen sehr kleinen Widerstand geschlossen, so ist die Klemmenspannung sehr klein. Denn dann ist die Stromstärke sehr groß, also der

Spannungsverlust im Innern auch sehr groß. Die Klemmenspannung ist immer gleich dem Produkt aus dem äußeren Widerstande und der Stromstärke.

Ganz anders liegen die Verhältnisse bei den eigentlichen Dynamomaschinen, welche Selbsterregung haben, bei denen also der Strom der Maschine selbst erst die Magnete erregt. In diesen ist die Stärke der Magnete nicht unveränderlich, ein für allemal gegeben, sondern sie hängt ab von der Stärke des in der ganzen Leitung fließenden Stromes, also auch von dem äußeren Widerstand. Von der Stärke der Magnete hängt aber wieder die elektromotorische Kraft der Induktionsströme ab. Bei den Dynamomaschinen hängt also die elektromotorische Kraft wesentlich ab von der Größe des äußeren Widerstandes, bei jeder Änderung des äußeren Widerstandes ändert sich auch die elektromotorische Kraft der Maschine. Wird z. B. der äußere Widerstand größer, so wird zuerst die Stromstärke kleiner, dadurch werden bei Hauptstrommaschinen die Magnete schwächer und dadurch wird wieder die elektromotorische Kraft kleiner. Und diese bewirkt für sich dann wieder eine Verringerung der Stromstärke in dem ganzen Kreise. Also die Dynamomaschinen sind in Bezug auf die in ihnen erzeugte elektromotorische Kraft sehr empfindlich gegen Änderungen im äußeren Schließungskreis.

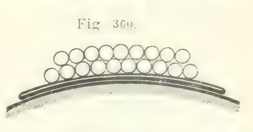
Von wesentlicher Bedeutung für die Kenntnis von Maschinen ist es, zu wissen, in welcher Weise sich die Klemmenspannung (der Spannungsunterschied an den beiden Polklemmen) und in welcher Weise sich die Stromstärke mit dem äußeren Widerstand ändert. Die verschiedenen Schaltungsweisen der Dynamomaschinen bringen gerade darin wichtige Verschiedenheiten hervor, die wir aber erst später besprechen wollen.

Die Konstruktionsgrundsätze, durch welche man die Dynamomaschinen allmählich immer mehr zu vervollkommnen gelernt hat, haben sich aus theoretischen und praktischen Untersuchungen herausgebildet.

Zunächst ist klar, daß die Größe der erzeugten elektromotorischen Kraft unter sonst gleich bleibenden Verhältnissen immer abhängt von der Stärke des magnetischen Feldes, innerhalb dessen der Anker, die Armatur, rotiert. Es kommt also darauf an, die Stärke dieses Feldes möglichst groß zu machen. Deshalb wird bei allen Konstruktionen das Hauptaugenmerk auf die magnetische Disposition der Maschinen gelegt. Für die Stärke des magnetischen Feldes, das aus den Magnetschenkeln und dem magnetisch induzierten Eisenkern des Ankers gebildet wird, ist die Hauptforderung, daß der magnetische Widerstand (S. 173) möglichst klein sei. Es müssen erstens die Magnetschenkel selbst möglichst kräftig sein, es müssen aber auch die sie verbindenden Rückplatten genügend großen Querschnitt haben. Ferner wird der magnetische Widerstand solcher Elektromagnete bedeutend erhöht, wenn zwischen den Schenkeln und den Rückplatten keine guten Verbindungen, sondern Luftzwischenräume sind. Man stellt daher häufig das ganze Schenkeleisen aus einem Stücke Gußstahl oder aus Flußeisen her. Wenn man Schmiedeeisen benutzt, so legt man ein

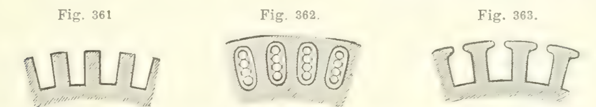
Hauptaugenmerk darauf, daß alle Teile der Magnete gut verschraubt und sorgfältig aneinander gefügt sind. Ebenso muß der Anker, um stark magnetisch zu werden, genügende Dicke haben. Aber das Ankereisen soll, wie wir bereits gesehen haben, nicht aus einem Stücke bestehen, wegen der Foucaultschen Ströme. Es soll vielmehr sorgfältig zerteilt sein und wird deshalb gewöhnlich aus gefirnißtem Eisendraht oder Eisenband oder Eisenblechen zusammengesetzt. Der Anker wird gewöhnlich aus dem magnetisch vorzüglichen Schmiedeeisen, das Magnetgestell aus Gußstahl oder dem billigeren Gußeisen hergestellt, wobei die Dimensionen des Magnetgestells bei gleicher Leistung im letzteren Fall bedeutend größer sein müssen, wie im ersten Fall.

Fig. 360.



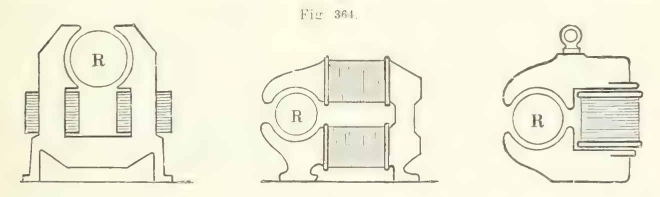
Für die Stärke des magnetischen Feldes ist weiter notwendig, daß der Zwischenraum zwischen dem Eisen der Schenkel und dem Eisen des Ankers so klein wie möglich sei. Wenn die Drahtwindungen auf den Anker aufgewunden werden, wie in Fig. 360, so wird durch den Raum, den sie einnehmen, an sich schon der Abstand des Ankers von den Feldmagneten vergrößert, abgesehen von dem Spielraum, den man für die ungehinderte Rotation immer zwischen Anker und Feld-

Fig. 361 Fig. 362. Fig. 363.



magneten lassen muß. Man ist infolgedessen davon abgekommen, solche glatte Anker herzustellen. Vielmehr bildet man jetzt den Anker gewöhnlich als *Zahnanker* oder *Nutenanker*, d. h. man gibt dem Anker in seiner Längsrichtung Zähne oder Nuten, in welche die Drähte eingelegt werden. Fig. 361 gibt die Ansicht eines solchen Zahnankers. Man ist sogar dazu übergegangen, die Drähte in Löcher einzuziehen, die in das

Fig. 364.

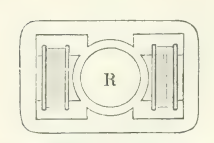


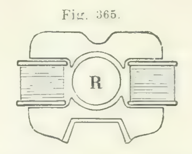
Eisen eingebohrt wurden. Einen solchen *Lochanker* zeigt Fig. 362. Doch ist es vorteilhaft, die Löcher oben zu öffnen, wie in Fig. 363 und derartige Armaturen werden jetzt vielfach angewendet.

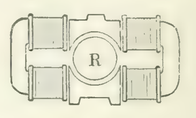
Für die möglichst vollkommene Ausnutzung einer Maschine ist es ferner notwendig, daß die erzeugten magnetischen Kraftlinien möglichst wenig *Streuung* besitzen, also möglichst vollständig den Anker induzieren. Um dies zu erreichen, hat man dem Magnetgestell verschie-

dene Formen gegeben, von denen einige in den Fig. 364 und 365 dargestellt sind. Bei den Maschinen in Fig. 364 hat das Magnetgestell die Form eines stehenden oder liegenden Hufeisens, in Fig. 365 ist das

Fig. 365.







Eisengestell ringförmig geschlossen. Die letztere Form hat sich als die bessere bewährt.

Bei dieser Ringform des Magnetgestells kann man nun auch statt bloß zweier Magnetpole eine beliebige grade Anzahl auf dem Ring anbringen und man unterscheidet danach vierpolige, sechspolige u. s. w. vielpolige (multipolare) Maschinen. Fig. 366 gibt das Schema zweier solcher vierpoligen Maschinen, bei welchen die vier abwechselnden Nord- und Südpole auf einem Ringgestell angebracht sind und den innen liegenden Anker induzieren. Mitten zwischen zwei entgegengesetzten Magnetfeldern befindet sich dann immer eine neutrale Zone, oder vielmehr, wie wir wissen, nicht genau in der Mitte, sondern etwas verschoben in Richtung der Rotation des Ankers. Daher sind in einer vierpoligen Maschine, wie in Fig. 366, vier neutrale Zonen vorhanden, an denen die vier Bürsten schleifen, an einer sechspoligen sechs u. s. w. Man verbindet die entsprechenden Bürsten entweder hintereinander oder meistens nebeneinander und leitet von den freien Endbürsten den Strom nach außen. Allgemein sind jetzt die meisten Fabriken zu dem Typus der ringförmigen Maschine mit zwei oder mehr Polen übergegangen. Fig. 359 zeigte das Magnetgestell einer sechspoligen Maschine mit Hilfspolen.

Fig. 366.

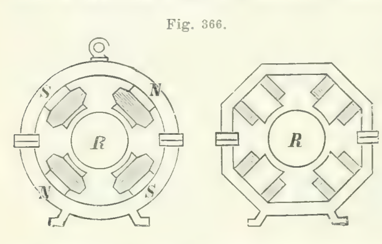
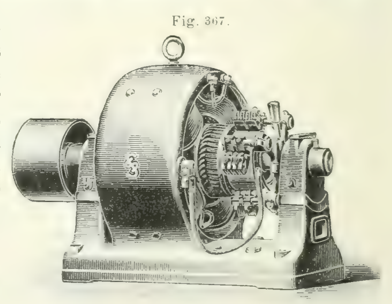


Fig. 367.

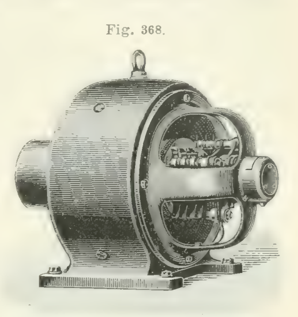


Man klassifiziert allgemein die Maschinen nach der Anzahl der Kilowatt, die sie leisten können, wobei 1 Kilowatt nach S. 115 ungefähr gleich 1.36 Pferdekräften ist. Maschinen bis zu 10—15 Kilowatt werden fast immer zweipolig gebaut. Von 15 bis etwa 120 Kilowatt baut

man vierpolige, von 120 bis 300 Kilowatt sechspolige Maschinen u. s. w. An den Grenzen dieser Bezirke kann man natürlich ebenso vorteilhaft die eine oder die andere Art benutzen.

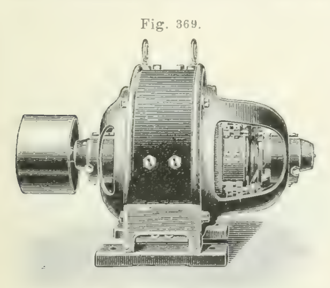
Um die Erwärmung der Drähte durch Joulesche Wärme in mäßigen Grenzen zu halten, wird die Drahtdicke so gewählt, daß pro Ampere etwa $^1/_2$ Quadratmillimeter besten Kupferdrahts benutzt wird. Aus dem von der Maschine verlangten Strom kann man daher die Dicke der Drähte oder Stäbe berechnen, welche auf dem Anker untergebracht werden sollen. Die Erwärmung der Drähte durch den Strom wird gemildert durch die Luftströmungen, die bei dem Gang der Maschine auftreten. In manchen Fällen muß man aber die Maschinen, etwa wenn schädliche Säuredämpfe in dem Raum herrschen, in dem sie aufgestellt sind, oder wenn Staub und Schmutz in sie eindringen kann, vollständig einkapseln. In diesem Fall wird natürlich die Erwärmung der Maschine unter sonst gleichen Umständen viel größer, oder vielmehr, man kann solche eingekapselte Maschinen bei gleicher Größe nur für geringere Ströme herstellen.

Fig. 368.



Wenn eine Maschine für eine vorgeschriebene Leistung in Bezug auf Spannung und Strom gebaut werden soll, so kann der Ingenieur durch Rechnung von vornherein die einzelnen Konstruktionsdetails feststellen und er kann mit gleicher Sicherheit eine Maschine vorher berechnen, die 5 Volt Spannung und 50 Ampere Strom geben soll, wie eine solche, die 500 Volt Spannung und 1000 Ampere leisten soll.

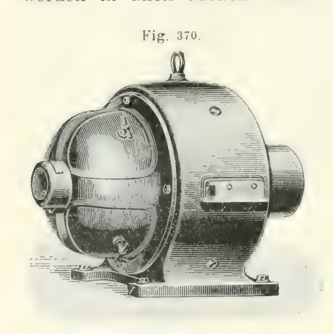
Fig. 369.



Der allgemeine Typus der modernen Dynamomaschinen verschiedener Fabriken ist heutzutage derselbe. Das Magnetgestell wird gewöhnlich ringförmig angeordnet, die Pole desselben ragen nach innen, und zwischen ihnen rotiert der Anker. So zeigt Fig. 367 eine vierpolige Dynamomaschine der Siemens-Schuckertwerke, die Fig. 368 eine Maschine der Allgemeinen Elektrizitätsgesellschaft (A.E.G.), die Fig. 369 eine Maschine der Bergmann Elektrizitätswerke in Berlin. Bei den beiden letzteren Maschinen sind die Lager der Achse als Armsysteme ausgebildet, die den inneren Teilen einen Schutz gewähren. Auch können die freibleibenden Öffnungen noch durch Deckel verschlossen werden, so daß dann die Maschinen gekapselt sind. Fig. 370 zeigt die Maschine der A.E.G. gekapselt. Der

Anker, bei allen Maschinen ein Trommelanker, sitzt gut ausbalanciert auf einer Achse, deren Lager im Gestell der Maschine angebracht sind. Der breite Kommutator wird von einer Anzahl, 4 bis 6, parallel verbundener Bürsten bestrichen. Diese Maschinen werden gewöhnlich durch Riemen mit der Dampfmaschine oder dem Gasmotor verbunden. Sie werden in allen Größen von 2 bis zu mehreren hundert Pferdekräften nach demselben Typus gebaut und können für alle Spannungen bis zu mehreren hundert Volt gewickelt werden. Kleinere Maschinen der Siemens-Schuckertwerke sind zweipolig und haben die in Fig. 371 gezeichnete Form.

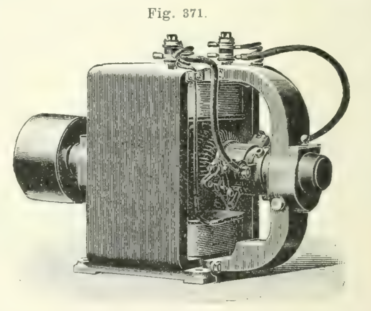
Fig. 370.



Außer den eben genannten bedeutendsten Fabriken Deutschlands liefern noch andere große Gesellschaften Gleichstrommaschinen, die wir aber hier, um nicht zu ausführlich zu werden, übergehen müssen. Die Maschinen der verschiedenen Fabriken unterscheiden sich, wie gesagt, im allgemeinen und speziellen Aufbau verhältnismäßig wenig, weil die theoretischen Grundlagen, nach denen sie ausgeführt werden, mit großer Sicherheit bekannt sind.

Je größer die Anzahl der Pferdekräfte ist, die eine Dynamomaschine aufnehmen soll, um so größer müssen im allgemeinen ihre Dimensionen sein. Der bewegliche Anker, der sich innerhalb des festen Magnetmantels dreht, erfährt aber durch die Drehung erhebliche Zentrifugalkräfte, die um so größer sind, je größer die Drehungsgeschwindigkeit und je größer der Durchmesser des Ankers ist. Um daher die Zentrifugalkräfte bei wachsendem Durchmesser des Ankers nicht zu groß werden zu lassen, mußte man notwendig die Umdrehungsgeschwindigkeit der Maschine verkleinern und ihr dafür, um dieselbe hohe elektromotorische Kraft zu erzielen, viele Pole geben. So bildete sich der Typus der großen Maschinen derart aus, daß sie langsam laufende, vielpolige Maschinen wurden.

Fig. 371.

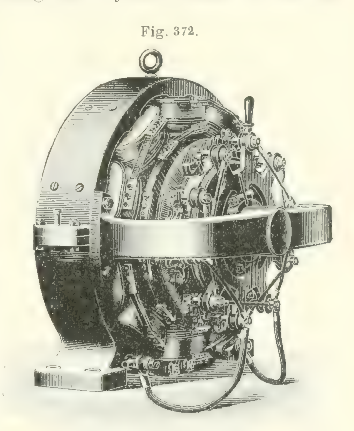


Die langsam laufenden Maschinen aber von großem Durchmesser haben schon an sich die Form großer Schwungräder. Es lag daher der Gedanke nahe und er wurde mit Vorteil ausgeführt, die Dampfmaschinen oder Gasmotoren so direkt mit der Dynamomaschine zu verbinden, daß die letztere die Stelle des Schwungrades der ersteren vertritt. So entstanden die Gruppen, welche man als *Dampfdynamos* oder Generatordynamos bezeichnet. Die großen Dynamomaschinen werden also ge-

wöhnlich nicht durch Riemen von einer Dampfmaschine oder Gasmaschine angetrieben, sondern sie werden direkt auf die Achse dieser Antriebmaschinen gesetzt, sind also mit der Antriebmaschine gekuppelt. Unter Umständen verbindet man auch kleinere Dynamos, namentlich auf Schiffen, direkt mit der Dampfmaschine. Eine solche vielpolige Maschine zum Anbau an Dampfmaschinen oder Gasmotoren zeigt Fig. 372. Die allgemeine Einrichtung derselben geht aus der Figur klar hervor. Die abgebildete Maschine ist 12polig, hat also auch 12 Bürstenreihen am Kommutator. Die Maschine ist besonders flachgebaut, der Anker ist verhältnismäßig sehr kurz.

In dieser Zusammensetzung von Generator und Dynamo kann man mit Recht die vollkommenste Ausbildung des Dynamobaues sehen, da hierbei ohne jedes kraftverzehrende Zwischenglied die Arbeit des Generators direkt durch die Dynamomaschine in elektrische Energie umgewandelt wird.

Fig. 372.



Seit wenigen Jahren hat durch die Vervollkommnung der Dampfturbinen diese Frage eine neue Seite gewonnen. Während die großen Dampfmaschinen langsam laufen und daher die mit ihnen verbundenen Dynamos vielpolig gemacht wurden, um bei der langsamen Umdrehung die nötige Spannung zu erzeugen, sind die Dampfturbinen im Gegenteil sehr rasch laufende Maschinen. Sie machen, nicht wie die großen Dampfmaschinen 100 bis 300, sondern im allgemeinen 1500 bis 3000 Umdrehungen pro Minute. Die mit solchen Turbinen gekuppelten Dynamos, die man Turbodynamos nennt, dürfen infolgedessen nicht große Durchmesser haben wegen der Zentrifugalkraft, sondern sie müssen in radialer Richtung verhältnismäßig kleine Abmessung haben. Um aber doch hohe elektromotorische Kraft zu erhalten, verlängert man sie in der Richtung der Achse, man macht also die Trommel lang, ohne ihren Durchmesser zu vergrößern. So erhalten die Turbodynamos ein etwas anderes Aussehen als die Dampfdynamos.

Es ist nun an der Zeit, daß wir die Unterschiede, welche zwischen Hauptstrommaschinen, Nebenschlußmaschinen und Compoundmaschinen in ihrem Verhalten bestehen, näher untersuchen. Diese Unterschiede beziehen sich hauptsächlich darauf, wie sich die Klemmenspannung und die Stromstärke dieser Maschinen ändern, wenn man den Widerstand im äußeren Stromkreis ändert. Wenn der Widerstand des äußeren Stromkreises wächst, von einem sehr kleinen Werte an bis zu einem sehr großen, wie ändert sich damit die Klemmenspannung der Maschinen und wie ändert sich die Stromstärke im Hauptstromkreis?

1. Nehmen wir also erst eine Dynamomaschine mit Fremderregung, bei der die Magnete durch einen besonderen Strom von außen erregt werden, so daß also der Magnetismus unabhängig von dem äußeren Widerstand bleibt. Dann ist die elektromotorische Kraft der Maschine immer (bei gleichbleibender Tourenzahl) dieselbe, wie groß oder wie klein auch der äußere Widerstand sei. Die Klemmenspannung aber ist für verschiedene Widerstände verschieden. Sind die Klemmen durch einen ganz geringen Widerstand verbunden, so ist die Differenz ihrer Spannungen sehr klein. Je größer der äußere Widerstand wird, desto mehr nimmt die Klemmenspannung zu, und bei unendlich großem Widerstand, d. h. bei offenem Stromkreis, ist die Klemmenspannung gleich der elektromotorischen Kraft der Maschine. Die Klemmenspannung nimmt also bei wachsendem äußeren Widerstand stets zu, erst rasch, dann langsamer und nähert sich dem Grenzwert der konstanten elektromotorischen Kraft.

Die Stromstärke im äußeren Stromkreis erhält man in Ampere durch Division der Klemmenspannung durch den äußeren Widerstand. Sie ist sehr groß, wenn der äußere Widerstand sehr klein ist, und nimmt mit wachsendem Widerstand rasch ab und wird 0, wenn der Widerstand unendlich groß ist. Wenn die Pole einer Stromquelle durch einen sehr geringen äußeren Widerstand verbunden werden, so sagt man, es herrsche ein Kurzschluß. Durch einen solchen wird also die Stromstärke außerordentlich groß.

2. Nehmen wir zweitens eine Dynamomaschine, bei der die Magnete im Nebenschluß liegen, also durch einen Zweigstrom erregt werden. Hier tritt dasselbe Verhalten für die Klemmenspannung ein, wie bei einer fremderregten Maschine, und zwar in verstärktem Maße. Denn wenn der äußere Widerstand sehr klein ist, so geht der Hauptstrom durch diesen, der Zweigstrom um die Magnete ist sehr schwach und daher sind die Magnete sehr schwach, woraus folgt, daß die elektromotorische Kraft sehr klein und infolgedessen auch die Klemmenspannung sehr klein ist. Wird dagegen der äußere Widerstand immer größer, so nimmt die Stärke der Magnete stets zu, da dann ein immer größerer Teil des Stromes um die Magnete fließt, und infolgedessen wächst auch die elektromotorische Kraft und die Klemmenspannung. Also auch hier nimmt die Klemmenspannung bei wachsendem äußeren Widerstand stets zu, erst rasch, dann langsamer, und wird endlich nahezu konstant.

Die Stromstärke im äußeren Stromkreis ist anfangs (bei kleinem Widerstand) gering, weil die Magnete schwach sind. Sie wächst dann, wenn der Widerstand größer wird, weil die Magnete stärker werden. Man hat hier also das eigentümliche Verhalten, daß die Stromstärke in einem Stromkreis wächst, wenn der Widerstand wächst, wobei sie ja eigentlich abnehmen sollte. Das kommt natürlich daher, daß dabei die Magnete stärker erregt werden, also die elektromotorische Kraft der Maschine steigt. Wenn aber der äußere Widerstand noch mehr wächst, so nimmt die Stromstärke wieder ab. Die Stromstärke erreicht also bei einem bestimmten äußeren Widerstand einen maximalen Wert und nimmt dann

wieder ab, um bei sehr großem Widerstand nahezu gleich Null zu werden.

3. Drittens betrachten wir eine Hauptstrommaschine (Serienmaschine). Hierbei ist bei geringem äußeren Widerstand der ganze Strom sehr stark, also sind die Magnete sehr stark und daher wird die elektromotorische Kraft sehr groß und deshalb auch die Klemmenspannung verhältnismäßig groß. Mit wachsendem Widerstand wächst anfangs auch die Klemmenspannung. Aber dann wird durch den schwächer werdenden Strom auch der wirksame Magnetismus und damit die elektromotorische Kraft kleiner und daher nimmt auch die Klemmenspannung wieder ab, die bei ungeschlossener Maschine schließlich zu Null wird. Die Klemmenspannung nimmt bei wachsendem äußeren Widerstand erst ein wenig zu und dann stetig ab. Die Stromstärke nimmt mit wachsendem äußeren Widerstand rasch und stetig ab.

Das Verhalten der Klemmenspannung ist also in diesem Falle ziemlich das entgegengesetzte von dem bei einer Nebenschlußmaschine. Dort nimmt die Klemmenspannung von Null an bis zu einem größten Wert zu, hier nimmt sie von einem größten Wert bis zu Null ab. Man wird also schon von vornherein sagen können, daß, wenn man die Magnete sowohl durch den Hauptstrom als durch einen Zweigstrom erregt, wie es in der Compoundschaltung geschieht, man erreichen können wird, daß die Klemmenspannung sich fast gar nicht ändert, wenn auch der äußere Widerstand stark variiert. Dies ist in der Tat der Fall und gerade aus diesem Grunde werden die Maschinen für bestimmte Zwecke mit Compoundschaltung konstruiert.

4. Bei den Compoundmaschinen kann man es durch richtige Bemessung der Hauptstromwickelung und der Nebenschlußwickelung für die Magnete oder, wie man es nennt, durch richtige Compoundierung dahin bringen, daß die Klemmenspannung fast ganz unabhängig von dem äußeren Widerstand wird, daß sie für alle äußeren Widerstände ziemlich dieselbe ist. Man kann es erreichen, daß bei Compoundmaschinen die höchste Änderung der Klemmenspannung nur 1—2 Proz. ihres Wertes beträgt. Die Stromstärke nimmt daher dann mit wachsendem Widerstand stetig ab, was bei konstanter Klemmenspannung selbstverständlich ist.

Von der Klemmenspannung und der Stromstärke hängt in jedem Falle der elektrische Effekt ab, der im äußeren Stromkreis herrscht. Gerade die Vorgänge im äußeren Stromkreis, z. B. das Brennen von Lampen oder das Treiben von elektrischen Motoren oder galvanoplastische Vorgänge, sind es ja, welche die nützliche Arbeit der Dynamomaschinen ausmachen.

Die Klemmenspannung einer Maschine in Volt ausgedrückt, multipliziert mit der Stromstärke im äußeren Stromkreis in Ampere gibt den äußeren Effekt in Watt, oder wenn man die Zahl der Watt durch 736 dividiert, in Pferdekräften. Man gibt bei jeder Maschine gewöhnlich, um sie zu charakterisieren, an, welches ihre normale Tourenzahl sein soll und wie groß in diesem Falle die höchste zulässige Stromstärke in Ampere

(bei der die Erwärmung der Drähte noch einen zulässigen Wert hat, ca. 70° C.) und die zugehörige Klemmenspannung in Volt ist. Also eine Maschine z. B., welche bei 110 Volt Klemmenspannung 80 Ampere gibt, erzeugt im äußeren Stromkreis einen Effekt von 8800 Watt oder 12 PS. Außer diesem äußeren, nutzbaren Effekt, der natürlich von einer Kraftquelle (Dampfmaschine, Gasmaschine, Turbine) auf die Dynamomaschine übertragen werden muß (durch Riemen, Zahnräder oder dergl.), verbraucht aber jede Maschine noch einen bestimmten Effekt in ihrem Innern bloß dadurch, daß der Strom im Anker und um die Magnete herum fließt und diese erwärmt. Es ist die Aufgabe einer guten Maschinenkonstruktion, diesen Effekt im Innern möglichst klein zu machen, damit der Hauptteil der übertragenen Arbeit im äußeren Stromkreis wirklich nutzbar verwendet werden kann. Das Verhältnis des äußeren Effekts zum gesamten (im Innern der Maschine und im äußeren Stromkreis zusammen) entwickelten elektrischen Effekt nennt man den elektrischen Wirkungsgrad der Maschine und drückt ihn in Prozenten aus. Dieser beträgt bei den größten Maschinen bis zu 96 Proz., wenn die Maschinen, wie man sagt, voll belastet sind, d. h. wenn die Stromstärke im äußeren Kreis so groß ist, wie sie bei der betreffenden Maschine sein soll.

Selbstverständlich muß die in jeder Sekunde von der Betriebsmaschine (Dampfmaschine, Turbine etc.) geleistete Arbeit noch größer sein als der im Stromkreis enthaltene totale Effekt. Denn die Betriebsmaschine hat erstens noch die mechanische Reibung der Maschinenteile zu überwinden; zweitens aber wird noch ein nicht unerheblicher Bruchteil der Arbeit sofort in Wärme verwandelt, teilweise durch das fortwährende Ummagnetisieren des Ankers, also durch die Hysteresis, teilweise durch die Wirbelströme, welche vollständig selbst bei guter Zerteilung der Metallmassen nicht zu vermeiden sind. Man nennt das Verhältnis:

$$\frac{\text{elektrischer Effekt im äußeren Stromkreis}}{\text{gesamter aufgewendeter Effekt}}$$

den Wirkungsgrad der Maschine. Dies ist also eine für die Beurteilung der Maschine sehr wesentliche Größe. Gut gebaute Dynamomaschinen haben einen Wirkungsgrad, der bei kleinen raschlaufenden Maschinen 75 bis 80 Proz. beträgt, bei großen langsam laufenden Maschinen aber bis auf 95 Proz. steigt.

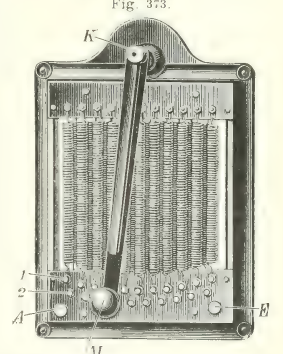
Durch die Anforderungen der Praxis hat sich allmählich der Bedarf an Nebenschlußmaschinen als weit größer erwiesen, wie der an Hauptstrommaschinen und Compoundmaschinen. Die ersteren nämlich sind für fast alle Zwecke, für die Beleuchtung, die Kraftverteilung und für die Elektrochemie vorzüglich geeignet, weil sie, neben sonstigen Vorteilen, namentlich eine leichte Regulierung der Klemmenspannung ermöglichen; sie sind also da immer besonders brauchbar, wo die Maschine nicht immer denselben, sondern, je nach Bedarf, verschiedenen Effekt abzugeben hat. Die Hauptstrommaschinen dagegen eignen sich gut für diejenigen Fälle, in denen immer dieselbe Leistung verlangt wird, z. B. für die Beleuchtung von Straßen mit Bogenlicht, wobei immer dieselbe Zahl

Lampen brennt, also immer derselbe Effekt von der Maschine verlangt wird.

Bei den Nebenschlußdynamos kann man in sehr einfacher Weise die Klemmenspannung konstant halten oder ändern und damit die Stromstärke im äußeren Stromkreis regulieren, ohne in den äußeren Stromkreis nutzlose Widerstände einzuführen.

Man braucht nämlich nur in den Zweigstrom, welcher um die Magnete fließt, einen regulierbaren Widerstand einzuschalten, um dadurch die Klemmenspannung auf jeden beliebigen Wert bringen zu können. Einen solchen Widerstand nennt man N e b e n s c h l u ß r e g u l a t o r. Schaltet man in die Magnetbewickelung Widerstände ein, so wird dieser Nebenstrom schwächer und infolgedessen auch die Klemmenspannung der Maschine. Schaltet man Widerstände aus dem Regulator, also aus dem Nebenstrom aus, so wird dieser letztere stärker und daher auch die Klemmenspannung der Maschine. So kann man leicht die Klemmenspannung der Maschine verändern, oder man kann sie auch, wenn man will, immer auf dieselbe Größe bringen, wie groß auch die Stromstärke im äußeren Stromkreis ist. Um die vorhandene Spannung erkennen zu können, ist mit den Klemmen der Maschine dauernd ein Spannungsmesser (Voltmeter) verbunden. Es wird nun aus dem Regulator so viel Widerstand ein- oder ausgeschaltet, bis das Voltmeter die gewünschte Spannung zeigt.

Fig. 373.

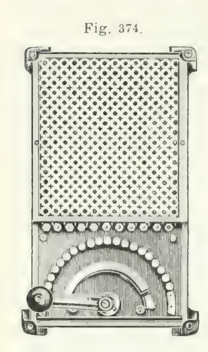


Der N e b e n s c h l u ß r e g u l a t o r besteht also aus Widerständen, welche in den Nebenstromkreis ein- und aus ihm ausgeschaltet werden können. Gewöhnlich wird der Regulator aus einem einfachen K u r b e l r h e o s t a t e n gebildet, von dem Fig. 373 eine Abbildung gibt. Wir haben den Apparat schon auf S. 89 beschrieben. Das eine Ende der Magnetbewickelung ist, wie man aus der Schaltung einer Nebenschlußmaschine in Fig. 355 auf S. 386 sieht, mit der Klemme E, das andere mit der Klemme A und dadurch mit der drehbaren Kurbel verbunden. Bei jeder Stellung der Kurbel ist nun ein anderer Widerstand in den Stromkreis eingeschaltet. Durch allmähliches Hineinschieben der Kurbel von A nach E sind immer weniger Widerstände in den Stromkreis eingeschaltet. Gewöhnlich sind die Widerstände des Regulators in einen Kasten eingeschlossen, auf dessen Deckel nur die Kontaktstücke und die Kurbel sichtbar sind. So zeigt Fig. 374 einen Nebenschlußregulator der Siemens-Schuckertwerke. Man sieht nur die Kurbel und die Kontaktstücke, die Widerstände selbst sind in dem Kasten angebracht.

Um die Klemmenspannung an den Polen einer Dynamomaschine in jedem Moment sofort ablesen zu können und dadurch etwaige Regulierungen am Nebenschlußregulator vorzunehmen, wird mit jeder Dynamomaschine ein V o l t m e t e r verbunden. Ebenso will man auch die Stromstärke im äußeren Stromkreis sofort, ohne Rechnung, ablesen

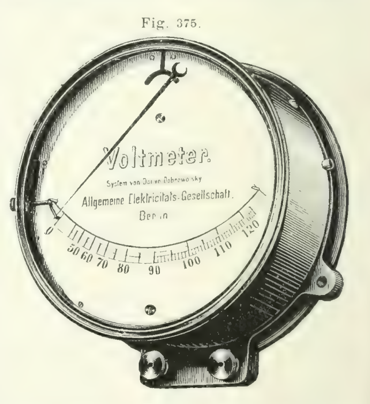
können und bringt zu dem Zweck in den Hauptstromkreis ein Amperemeter hinein. Es kommt bei diesen technischen Instrumenten weniger auf die äußerste Genauigkeit als vielmehr darauf an, daß sie unmittelbar die vorhandene Spannung und die vorhandene Stromstärke abzulesen gestatten, und zwar direkt die Stromstärke in Ampere und die Spannung in Volt. Ferner müssen sie hinreichend genaue Angaben auch bei sehr großen Intensitäten und Spannungen machen und endlich sollen sie unabhängig davon sein, daß in den Maschinenräumen, wo sie ja gewöhnlich aufgestellt werden, sich große Eisenmassen bewegen, wie die Kolben der Dampfmaschine, oder daß starke Magnete in der Nähe sind, wie die Feldmagnete der Dynamomaschine selbst. Solche Apparate werden natürlich nicht im ganzen Intervall von der kleinsten bis zur größten Stromstärke und von der kleinsten bis zur größten Spannung gleich genaue Angaben machen können. Am genauesten sollen sie dann bei denjenigen Stromstärken und Spannungen sein, welche für die betreffende Anlage die wichtigsten sind. Man hat solche Meßinstrumente für technische Zwecke in verschiedenartiger Weise konstruiert. Die Apparate für Strommessung und diejenigen für Spannungsmessung sind im allgemeinen ganz gleich konstruiert. Nur werden die Amperemeter direkt in den Hauptstrom eingeschaltet und enthalten deshalb wenig Windungen von dickem Draht, während die Voltmeter, wie wir oben S. 100 erklärt haben, eine Zweigleitung bilden und viele Windungen eines dünnen Drahtes erhalten. Man benutzt die verschiedenen magnetischen Wirkungen des Stromes zur Konstruktion solcher Meßapparate.

Fig. 374.



So wird bei einfachen Amperemetern und Voltmetern der A.E.G., von denen Fig. 375 die äußere Ansicht eines Voltmeters zeigt, die anziehende Wirkung benutzt, welche eine von einem Strom durchflossene Drahtspule auf einen Eisenkern ausübt. Man sieht in Fig. 376 die innere Einrichtung dieser Apparate. Die Drahtrolle a besitzt oben ein Lager, auf welchem ein Winkelhebel sich drehen kann. Dieser trägt den Eisenkern e, welcher außerordentlich leicht ist, 0,04 g wiegt, und der durch den Strom in die Spule mehr oder minder hineingezogen wird. Je nach der Drehung der Achse c, auf der er sitzt, wird dann auch der Zeiger f gedreht, der auf der Skala spielt. Durch eine größere oder geringere Länge des Eisenkerns, sowie durch passende Einstellung von

Fig. 375.



Reguliergewichten d kann man jede Skala herstellen. Das Instrument wird direkt auf Ampere oder auf Volt geeicht, je nachdem es im Hauptstrom oder im Nebenstrom liegt.

In ähnlicher Weise sind die Meßapparate von anderen Fabriken eingerichtet.

Meistenteils werden, obwohl diese Instrumente teuerer sind, auch für die technischen Anlagen Präzisionsmeßinstrumente angewendet, welche nach dem Deprezschen Prinzip (S. 187) auf der Ablenkung einer stromdurchflossenen Drahtrolle in einem starken magnetischen Feld beruhen. Sie sind unempfindlich gegen die Einwirkung von äußeren Eisenmassen im Maschinenraum und gegen die Wirkung von nahe vorbeifließenden starken Strömen. Die Apparate sind im Innern genau so konstruiert, wie das Amperemeter, das auf S. 189 beschrieben wurde. Die Voltmeter werden, wie immer, im Nebenschluß an die Klemmen der Dynamomaschinen geschaltet. Die Amperemeter aber werden nicht, wie gewöhnlich, direkt in den Hauptstromkreis gelegt. Vielmehr wird jedem Amperemeter ein genau abgemessener kleiner Widerstand beigegeben, der bei den kleinen Instru-

Fig. 376.

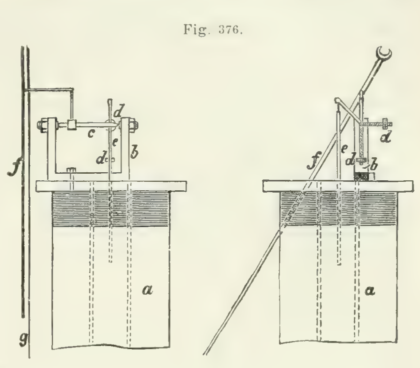
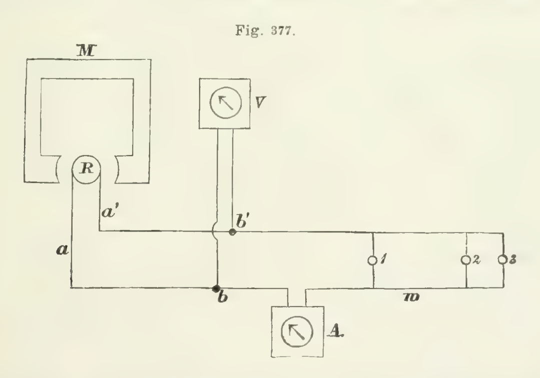


Fig. 377.



menten direkt im Gehäuse des Instrumentes liegt. Dieser kleine Widerstand ist es, der in den Hauptstromkreis eingeschaltet wird, und zu diesem liegt das Amperemeter im Nebenschluß. Die Skala ist in Ampere so geteilt, daß sie direkt die Stromstärke im Hauptstromkreis angibt.

Alle diese Apparate müssen natürlich zunächst geeicht werden, d. h. es muß die Skala in Ampere resp. Volt hergestellt werden, indem man Ströme von gemessener Stärke durch den Apparat direkt oder im Nebenschluß gehen läßt und den Ausschlag auf der Skala beobachtet.

Die Verbindung einer Dynamomaschine mit dem Voltmeter, dem Amperemeter und dem äußeren Stromkreis ist in Fig. 377 gezeichnet. Von dem Anker R der Maschine M gehen zwei Drähte aus, a b und a' b', welche zu den zwei Klemmschrauben b und b' führen. Von b und b' werden die Drähte w fortgeführt, welche die Hauptleitungen für die dazwischen zu schaltenden Apparate 1, 2, 3 u. s. w. bilden. In den einen dieser Drähte wird das Amperemeter A eingeschaltet. Das Voltmeter V dagegen wird in den Nebenschluß zu den beiden Drähten gelegt. Bei der wirklichen Benutzung der Dynamomaschinen sind allerdings diese Apparate noch nicht ausreichend. Vielmehr werden dann noch Ausschalter und Sicherungen mit einzuschalten sein, von denen wir aber erst im folgenden sprechen werden.

---

2. Kapitel.

Die Dynamomaschinen für Wechselstrom und Drehstrom.

Die Gleichstrommaschinen spielten lange Zeit die Hauptrolle in der Elektrotechnik. Man konnte anfangs mit Wechselströmen, die ja bei der abwechselnden Induktion zunächst auftreten, nicht viel anfangen, da die eigentümlichen Verhältnisse der Wechselströme, die sehr bedeutend von denen der Gleichströme abweichen, wissenschaftlich nicht näher untersucht waren. Dies hat sich aber jetzt vollständig geändert. Die Wechselströme, und zwar insbesondere die Kombination mehrerer Wechselströme, die man Drehströme nennt, sind heute für die Technik von höherer Bedeutung als die Gleichströme, weil sie es ermöglichen, eine Fortleitung und Verteilung der elektrischen Energie in so einfacher und billiger Weise herzustellen, wie es mit Gleichströmen nicht möglich ist. Dies beruht auf folgendem Umstand. Die Fortleitung von elektrischer Energie auf große Entfernung ist um so teurer, je größer die Stärke der Ströme ist, und um so billiger, je geringer die Stärke, je größer aber dafür die Spannung ist. Denn für starke Ströme braucht man Leitungen von großem Querschnitt, also viel Kupfer, und für schwache Ströme Leitungen von geringem Querschnitt, also wenig Kupfer. Kupfer ist aber teuer. Am vorteilhaftesten für die Fernleitung elektrischer Energie sind also Ströme mit möglichst hoher Spannung und geringer Stromstärke. Nun kann man zwar aus Maschinen aller Art prinzipiell Ströme von hoher Spannung erhalten, indem man nur die Zahl der Umwindungen auf dem Anker und die Geschwindigkeit der Umdrehungen groß zu machen braucht. Aber faktisch kann man bei Maschinen mit beweglichen Drahtwickelungen keine zu hohe Spannung erzeugen, weil ein Überschlagen der Elektrizität namentlich am Kommutator zu leicht eintritt. Hier haben nun die Wechselströme einen großen Vorteil vor den Gleichströmen. Einerseits nämlich haben die Wechselstrommaschinen überhaupt keinen Kommutator, und andererseits sind sie so konstruiert, daß die Drahtwickelungen, welche die hohe Spannung führen, überhaupt nicht bewegt werden, sondern fest stehen. Ferner aber kann man Wechselströme mit Leichtigkeit und Sicherheit durch die Transformatoren von geringer Spannung auf hohe Spannung bringen oder von hoher Spannung auf geringe Spannung zurückbringen, und damit hat man nun ein vorzügliches Mittel einerseits zur Fortleitung der Elektrizität auf billigste Weise, andererseits zu ihrer gefahrlosen Benutzung an den Verbrauchsstellen. Man erzeugt Wechselströme von hoher Spannung durch eine Wechselstrommaschine, leitet sie in die Ferne und dort transformiert man sie auf beliebige niedrige Spannung zurück. Mit gleichgerichteten Strömen kann man denselben Prozeß nicht so ausführen, weil man Gleichstrommaschinen für hohe Spannungen nicht bauen

und auch Gleichströme nicht in bequemer Weise transformieren kann. Dazu kommt noch, daß auch die Motoren, durch welche man mittels Drehstroms Arbeit leisten kann, jetzt sogar vollkommener sind als die Motoren für Gleichstrom. Aus diesen Gründen werden jetzt Wechselstrommaschinen und Drehstrommaschinen in großen Mengen gebaut und zum Teil solche von kolossalen Dimensionen. Ja es werden heutzutage die elektrischen Zentralen in größeren Städten meistenteils überhaupt nur noch mit Drehstrom ausgeführt, eben wegen der sonst unerreichbaren Billigkeit dieses Systems.

Die praktische Nutzbarmachung der Drehströme verdankt man der Allgemeinen Elektrizitäts-Gesellschaft in Berlin und der Maschinenfabrik Oerlikon in der Schweiz. Seit 1891 hat sich die Technik des Wechselstromes und Drehstromes, oder besser gesagt, die Technik der Ein- und Mehrphasenströme außerordentlich entwickelt und nimmt heute den breitesten Raum in der Elektrotechnik ein.

Wechselstrommaschinen sind prinzipiell viel einfacher als Gleichstrommaschinen zu bauen. Um Gleichströme zu erhalten, mußte erst Gramme seinen Ring oder Hefner-Alteneck seine Trommelwickelung ersinnen. Wenn man dagegen, ohne besondere Kunstgriffe, eine Anzahl von Drahtrollen (mit oder ohne Eisenkern) vor einer Anzahl von abwechselnden Magnetpolen rotieren läßt, dann werden von selbst in den Rollen abwechselnd entgegengesetzte Stromimpulse erzeugt. Und man braucht nun die Rollen nur passend zu verbinden, um einen oder mehrere Stromkreise mit Wechselströmen zu erhalten. Man ist dabei nicht gezwungen, eine Anzahl von Drahtspulen, seien sie auf einen Ring oder auf eine Trommel aufgewickelt, gerade in ganz bestimmter Weise zu verbinden, sondern man kann verschiedenfache Kombinationen anwenden. Man kann die Spulen alle hintereinander oder alle parallel verbinden, oder man kann mehrere getrennte Stromkreise mit gleicher oder verschiedener Phase (o. S. 252) bilden und diese auch wieder kombinieren und auf diese Weise leicht Maschinen für einfache Wechselströme wie auch für Mehrphasenströme konstruieren.

Die Wechselstrommaschinen und Drehstrommaschinen bestehen alle aus den induzierten Drahtspulen, die man zusammen als Induktor oder Anker oder Armatur bezeichnet, und den induzierenden Magneten. Als Magnete werden nur Elektromagnete benutzt. Und zwar werden bei den meisten Maschinen diese Elektromagnete durch einen besonderen Strom gespeist, der von einer Gleichstrommaschine erzeugt wird, die ganz getrennt von der Wechselstrommaschine ist. Manchmal aber sitzen diese Gleichstrommaschinen auf derselben Drehungsachse wie die Hauptmaschine für Wechselstrom. Man kann es aber auch so einrichten, daß man den Gleichstrom für die Elektromagnete nicht von einer besonderen Maschine entnimmt, sondern einen Teil des erzeugten Wechselstromes, den man von einigen besonderen Spulen des Ankers entnimmt, selbst durch einen Kommutator zu Gleichstrom macht und ihn so um die Magnete führt. Maschinen, die diese Einrichtung haben, nennt man selbsterregende Wechselstrommaschinen. Die Drahtspulen des Induktors werden auf Eisenkerne gewickelt, wodurch viel kräftigere Induktionsströme erzeugt werden, als wenn man auf die

Drahtrollen allein die Induktion wirken läßt. Die Eisenkerne werden aber dabei sehr rasch hintereinander nord- und südmagnetisch, und diese fortwährende Änderung des Magnetismus ist, wie wir wissen, mit erheblicher Erhitzung der Eisenkerne durch Hysteresis verbunden. Die dadurch verursachten Energieverluste werden um so größer, je mehr Polwechsel die Kerne pro Sekunde erfahren. Man kann daher praktisch bei Wechselströmen nicht jede beliebige Zahl von Polwechseln erreichen, sondern muß sich auf eine verhältnismäßig geringe Zahl (50 bis 100 pro Sekunde) beschränken. Außer den Energieverlusten durch Hysteresis hat man natürlich auch hier in den Kernen des Ankers die Foucaultschen Ströme (Wirbelströme), die man aber durch sorgfältige Zerteilung des Eisens beseitigen kann.

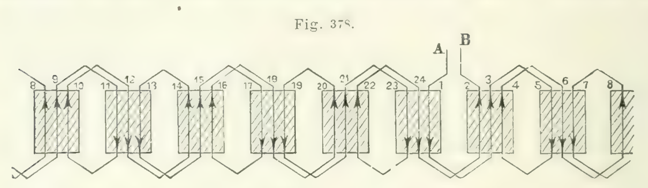
Während sich bei den Gleichstrommaschinen allgemein der Typus herausgebildet hat, daß innerhalb eines feststehenden ringförmigen Gestells, auf dem die Feldmagnete angebracht sind, der Anker dreht, ist bei den Wechselstrommaschinen gerade der umgekehrte Typus als vorteilhaft erkannt worden, daß die Feldmagnete rotieren und daß außen um sie herum der Anker feststehend angeordnet wird, so daß man von festen Klemmen den Strom vom Anker nach außen führen kann. Man bezeichnet den feststehenden Teil einer Wechselstrommaschine auch als den Stator, den rotierenden als den Rotor.

In jedem Fall unterscheiden sich die Wechselstrommaschinen von den Gleichstrommaschinen dadurch, daß sie absolut keinen Kommutator (Kollektor) brauchen, und das ist ein wesentlicher ökonomischer und konstruktiver Vorzug der Wechselstrommaschinen. Denn erstens ist der Kommutator ein der Abnutzung am meisten unterliegender Teil der Maschinen, zweitens aber ist gerade die Notwendigkeit des Kommutators bei Gleichstrommaschinen ein Hindernis dafür, sie für hohe Spannungen zu bauen. Am Kommutator würden sich die hohen Spannungen zunächst ausgleichen. Daher kann man Wechselstrommaschinen leicht für hohe Spannungen bauen, bis zu zehntausend und mehr Volt, während das bei Gleichstrommaschinen bisher nicht in praktischer Weise möglich ist.

Bei jeder Wechselstrommaschine hat man eine mehr oder minder große Anzahl von Spulen auf dem Anker, denen abwechselnd je ein Nordpol und ein Südpol der Feldmagnete gerade gegenüberstehen. Für die Verbindung zusammengehöriger Drähte des Ankers kann man nun verschiedene Methoden benutzen. Da in allen Spulen, welche gleichzeitig an Polen derselben Art, z. B. den Nordpolen, vorübergehen, Ströme nach der einen Richtung induziert werden, in den gleichzeitig an den Südpolen vorbeigehenden Spulen dagegen solche nach der anderen Richtung, so muß immer das Ende einer Spule der ersten Gruppe mit dem Anfang einer Spule der folgenden Gruppe verbunden werden, Anfang und Ende hier in der Richtung der induzierten Ströme genommen. Zwei verschiedene Arten dieser Verbindung sind in Fig. 378 und 379 gezeichnet. In beiden sind durch die schraffiert gezeichneten Rechtecke 8 aufeinanderfolgende, abwechselnde Magnetpole, Nord- und Südpole, dargestellt. Vor jedem Pol sind drei Drähte gezeichnet, im ganzen also 24. In diesen laufen die Ströme bei dem 1., 3., 5., 7. Pol (von links gerechnet) alle von unten nach oben,

bei dem 2., 4., 6., 8. Pol von oben nach unten. Die Figuren sind gradlinig auseinandergezogen, so daß der letzte halb angedeutete Pol rechts zugleich der erste Pol links ist. Man sieht, daß in Fig. 378, bei der wir von dem mit A bezeichneten Ende des Drahtes, der einen Endklemme, ausgehen, sich an den Draht 1 der Reihe nach alle anderen in passender Richtung anschließen, so daß immer Schleifen nach rechts und links gebildet werden, bis wir zur zweiten Endklemme B kommen. Eine solche Wickelung nennt man Schleifenwickelung. In Fig. 379 gehen wir auch von Klemme A aus zu Draht 1 und durchlaufen nun in anderer, aber auch richtiger Weise alle Drähte, bis wir zu Draht 20 kommen, der

Fig. 378.

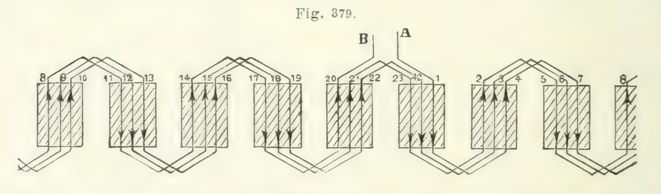


an die andere Endklemme B führt. Eine solche Wickelung nennt man eine Wellenwickelung. Beide Arten der Wickelung und noch andere werden angewendet.

Für die Konstruktion der Wechselstrommaschinen gelten ganz dieselben Grundsätze und Regeln wie für Gleichstrommaschinen (S. 394), nämlich starkes Magnetfeld, möglichste Ausnutzung aller Kraftlinien zur Induktion, geringer Zwischenraum zwischen Magneten und Ankerspulen.

Die Wechselstrom- und Drehstromdynamos zur Erzeugung von Strömen, die man auch Generatoren nennt, werden haupt-

Fig. 379.



sächlich in sehr großen, zum Teil riesigen Dimensionen gebaut. Für kleine Betriebe nämlich bietet der Gleichstrom manche Vorzüge vor dem Wechselstrom, während gerade bei großen Zentralanlagen, welche die Ströme oft auf weite Entfernung fortzuleiten haben, die hochgespannten Wechselströme, wie oben ausgeführt, besonders vorteilhaft sind.

Die modernen Wechselstrommaschinen haben alle ein feststehendes, ringförmiges Gehäuse aus Eisen, auf welchem die Spulen des Ankers sitzen. Die Feldmagnete sind der rotierende Teil der Maschine. Sie bestehen aus einem Kranz von abwechselnden Nordpolen und Südpolen, die entweder im Innern des Gehäuses rotieren, oder außen um dasselbe herumlaufen. Der erstere Fall ist der gebräuchlichere.

Der Bau der Wechselstrommaschinen und Drehstrommaschinen ist fast immer der gleiche, nur ist die Verbindung der Drähte auf dem Anker verschieden. Die Feldmagnete, die im Innern der Maschine rotieren, werden durch einen Strom erregt, der von einer besonderen Gleichstrommaschine geliefert wird, die gewöhnlich auf derselben Achse sitzt wie der Magnetstern. Die Pole der Feldmagnete sind abwechselnd nord- und südmagnetisch und tragen abgerundete Polschuhe, wo sie dem Ring gegenüberstehen. Der eiserne Ring selbst ist an seinem inneren Umfang mit einer Anzahl von Nuten versehen, und zwar sind dreimal so viel Nuten vorhanden als Magnetpole. Fig. 380 zeigt den Magnetkranz M und den Eisenring R mit seinen Nuten. Sowohl der Ankerring wie die Feldmagnete sind aus Blechen zusammengesetzt, um die Wirbelströme zu verhindern. Die Drahtwickelung des Ankers wird nun in die Nuten eingelegt, und zwar erhält man gewöhnlichen Wechselstrom (Einphasenstrom) oder dreiphasigen Wechselstrom (Drehstrom), je nach der Art, wie man die Nuten zur Wickelung benutzt.

Fig. 380.

Um *gewöhnlichen* (einphasigen) *Wechselstrom* zu erhalten, legt man, wie Fig. 381 zeigt, eine Wickelung in die Nuten 1 und 3, die folgende in 4 und 6 u. s. w., läßt also die Nuten 2, 5, 8 u. s. w. frei. Da die Wickelungen, deren drei mit a, b, c bezeichnet sind, in jedem Moment dieselbe Lage gegen die verschiedenen Magnetpole haben, so werden in ihnen Ströme von gleicher Phase induziert, wenn die Magnete sich drehen, aber natürlich in a und c Ströme, die, absolut genommen, die entgegengesetzte Richtung haben wie die in b u. s. w. Wenn man daher die Spulen alle hintereinander schalten will, so hat man die Spule b entgegengesetzt zu verbinden, also das Ende von a mit dem Ende von b und den Anfang von b mit dem Anfang von c. Die freien Enden der ersten und letzten Spule werden dann zu feststehenden Klemmen geführt, von denen man den Wechselstrom in den äußeren Stromkreis führen kann.

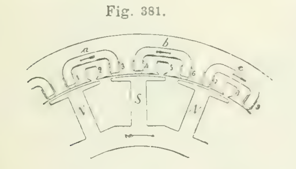


Fig. 381.

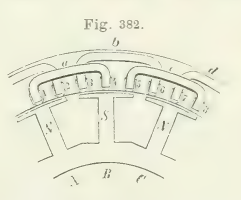


Fig. 382.

Um dagegen *Drehstrom* (dreiphasigen Wechselstrom) zu erhalten, macht man die Wickelung so, wie sie in Fig. 382 angedeutet ist. Die erste Wickelung a wird in Nute 1 und 4 gelegt, die zweite b in 3 und 6, die dritte c in 5 und 8 u. s. w.; es wird also keine Nute freigelassen. Man

sieht aus der Figur, daß in demselben Moment die Spule a gerade über der Mitte zweier Magnetpole sich befindet, während die Spule b über den Anfängen, die Spule c über den Enden steht. Bei der Rotation der Magnete entsteht nun in einer und derselben Spule, z. B. in a, wieder genau derselbe Stromimpuls wie bei der in der Figur gezeichneten Lage, wenn der erste Nordpol links (A) sich nach rechts bewegt hat, bis in die Lage des nächsten Nordpols rechts (C). Das heißt, eine volle Periode hat der Wechselstrom in jeder Spule, wenn das Magnetsystem sich von A bis C bewegt. Da nun der Winkel zwischen zwei aufeinander folgenden Nutensystemen (1, 3, 5) der dritte Teil dieses Winkels ist, so folgt, daß die Phasen der Wechselströme, die in a, b, c gleichzeitig induziert werden, um $\frac{1}{3} \times 360 = 120^0$ gegeneinander verschoben sind. Dieselbe Phase wie a hat nun die Spule d u. s. w. Kurz, wenn man die 1., 4., 7. Spule miteinander verbindet, ebenso die 2., 5., 8., ferner die 3., 6., 9., so erhält man drei getrennte Stromleiter, in denen Wechselströme von je 120⁰ Phasendifferenz auftreten. Diese drei Drehströme kann man nun verketten (S. 268), sei es in Dreieckschaltung, sei es in Sternschaltung.

Fig. 383.

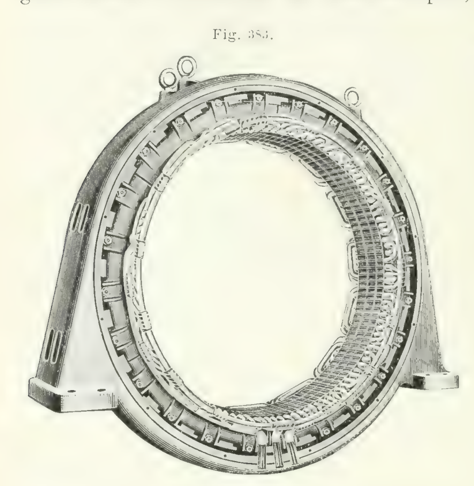
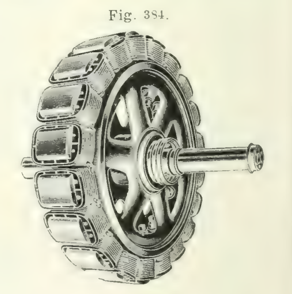


Fig. 384.

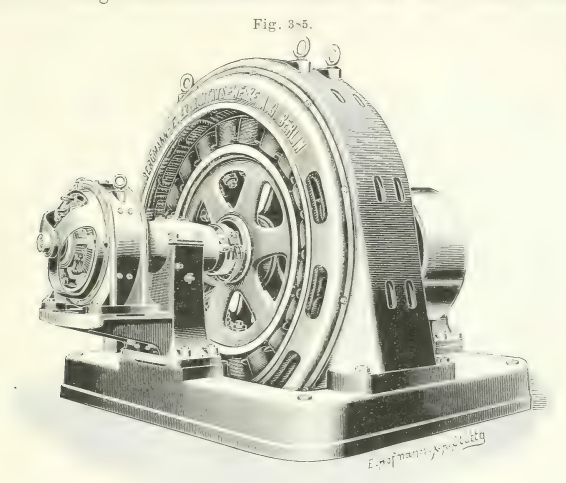


Die Abbildung eines ausgeführten Stators einer Drehstrommaschine der Bergmann-Elektrizitätswerke zeigt Fig. 383. Das ringförmige Gehäuse aus Eisen enthält auf seiner Innenseite die Spulen, welche in halbgeschlossene Nuten eingelegt und zweckmäßig isoliert sind. Der Rotor, der Magnetkranz, ist aus Fig. 384 ersichtlich, und die ganze Maschine wird durch Fig. 385 dargestellt. Das Gehäuse erhält noch Schutzschilde, um die Spulen vor Beschädigung zu schützen. An der ausgeführten Maschine sieht man noch vorn auf derselben Achse eine kleine Gleichstrommaschine, die den Erregerstrom für die Magnete liefert.

Auch die Allgemeine Elektrizitäts-Gesellschaft in Berlin baut einen Teil ihrer Drehstrommaschinen in derselben Weise. Fig. 386

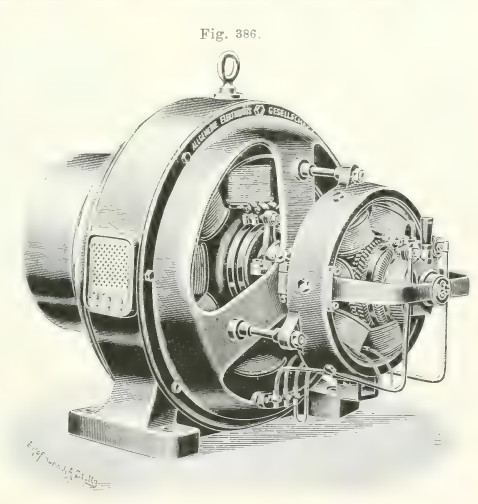
gibt eine Ansicht derselben, aus der allerdings bei der geschlossenen Bauart nur wenig Einzelheiten zu erkennen sind. Auf dem Umfang des

Fig. 385.



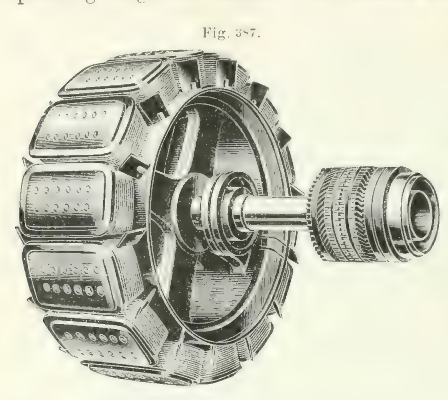
Gehäuses sind die induzierten Spulen isoliert angebracht. Die Magnetspulen im Innern kann man zum Teil erkennen. Auch hier ist die Erregermaschine für den Gleichstrom, den die Feldmagnete brauchen, gleich auf die Achse der ganzen Maschine gesetzt. Fig. 387 zeigt den beweglichen Teil einer solchen Maschine. Man sieht die Achse mit dem Magnetrad, auf dessen Eisenkerne die Magnetisierungsspulen, die besonders gewickelt werden, aufgeschoben und befestigt werden. Die Achse trägt zugleich rechts den Trommelanker der erregenden Gleichstromma-

Fig. 386.



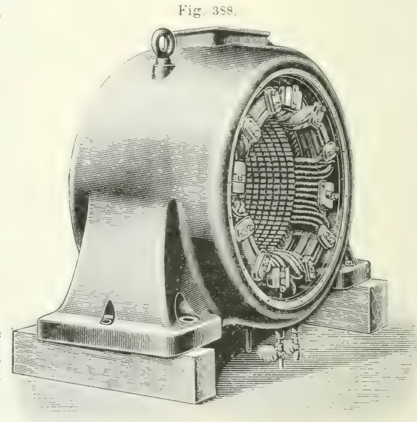
schine. Die Maschinen werden für verschiedene Spannungen zwischen 115 und 5250 Volt gebaut. Doch können sie auch bis zu 10 000 Volt Spannung ausgeführt werden. Bei anderen Maschinen werden die drehbaren Magnete außen, der feststehende Anker innen gelagert. Maschinen dieser Art bezeichnet man als solche vom Außenpoltypus.

Fig. 387.

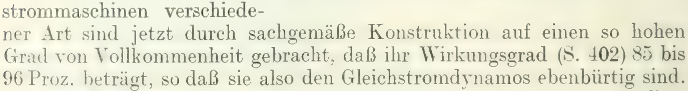


Bei dem Zusammenbau solcher Wechselstrommaschinen mit Dampfturbinen muß man auch hier, ebenso wie bei den Gleichstromturbodynamos, wegen der großen Umdrehungszahlen und der dadurch hervorgerufenen Zentrifugalkräfte die Maschine mehr in die Breite (in Richtung der Achse) als in die Höhe gehen lassen. Auch muß die Zahl der Pole eine geringe sein, um die üblichen und vorteilhaften 100 Polwechsel pro Sekunde zu erzeugen. Eine Maschine mit 3000 Touren pro Minute darf daher nur 2 Pole besitzen, eine solche mit 1500 Touren muß 4 besitzen. Die Teile einer solchen Turbodynamo für Wechselstrom zeigt Fig. 388 und 389. Fig. 388 zeigt das feste Gehäuse mit den Wickelungen, Fig. 389 den rotierenden Magnetkern mit 4 Abteilungen, Polen. Die Wickelungen sind bei letzterem im Innern angebracht, während die Pole mit Schlitzen versehen sind, um wirksame Luftkühlung zu ermöglichen.

Fig. 388.



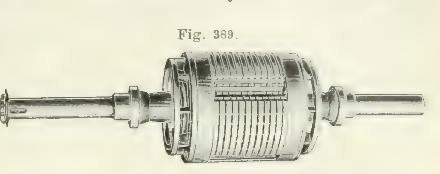
Die Wechsel- und Drehstrommaschinen verschiedener Art sind jetzt durch sachgemäße Konstruktion auf einen so hohen Grad von Vollkommenheit gebracht, daß ihr Wirkungsgrad (S. 402) 85 bis 96 Proz. beträgt, so daß sie also den Gleichstromdynamos ebenbürtig sind.



Um die Spannung in den Wechselstrommaschinen zu ändern, reguliert man, wie bei den Nebenschlußmaschinen für Gleichstrom, den Erreger-

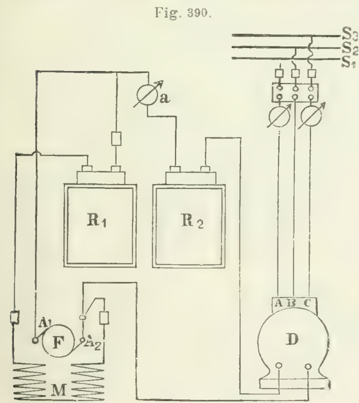
strom der Magnete. Indem man diesen stärker oder schwächer macht, wird auch die Spannung des Wechselstromes stärker oder schwächer. Man nimmt als Erregermaschine häufig Compoundmaschinen. Wenn man zur Erregung der Magnete eine Gleichstromnebenschlußmaschine oder eine Compoundmaschine anwendet, so werden einerseits Regulierwiderstände in deren Magnetkreis eingeschaltet, andererseits Regulierwiderstände in die Feldmagnete der Wechselstrom- oder Drehstromdynamos. Die ersteren dienen zur groben, die letzteren zur feinen Regulierung der gewünschten Wechselspannung. Eine solche Schaltung einer Drehstromdynamo mit einer Erregermaschine zeigt Fig. 390. Man sieht links in der Figur die Erregermaschine, eine Nebenschlußmaschine, deren Anker mit F bezeichnet ist. In ihre Magnetbewickelung M ist der Regulierwiderstand R_1 eingeschaltet. Von dem Anker F aus geht der Erregerstrom einerseits vermittels der Bürste A_1 durch den Regulierwiderstand R_2 (und zunächst durch ein Amperemeter a), andererseits von der Bürste A_2 direkt zur Drehstromdynamo D, d. h. zu ihren Feldmagneten.

Fig. 389.



Endlich geht von den Klemmen A, B, C der letzteren der Drehstrom aus, dessen 3 Leitungen durch Meßapparate zu 3 Schienen S_1 S_2 S_3, den Sammelschienen, auf dem Schaltbrett geführt werden.

Fig. 390.



Wie bei den Gleichstrommaschinen hat man auch bei den Wechselstrom- und Drehstrommaschinen die **Rückwirkung des Ankerstromes** auf die Feldmagnete zu beachten, die auch hierbei sehr merkwürdige Erscheinungen hervorbringt. Zunächst sollte man zwar glauben, daß eine Ankerrückwirkung hier nicht stattfindet und zwar deswegen, weil ja der Ankerstrom ein Wechselstrom ist, während die Magnete durch Gleichstrom erregt werden. Aber eine genauere Betrachtung zeigt, daß sie trotzdem auch hier stattfinden muß. Nehmen wir z. B., um die Vorstellungen zu fixieren, an, daß wir eine Maschine haben, deren Magnete sich drehen, während der Anker fest ist. Sie habe etwa 6 abwechselnde Magnetpole und 6 Spulen im Anker. Dem Nordpol I steht dann in einem bestimmten Moment eine Spule 1 gegenüber, dem Südpol II die Spule 2. In diesem Moment fließt in den gesamten Ankerspulen ein Strom nach einer Richtung, der, da die Spulen jeweilig passend zusammengeschaltet sind, etwa den Nordpol I und den Südpol II verstärkt. Ist die Spule 1 bei der Drehung zum Süd-

pol II gekommen, so würde sie zwar jetzt den Südpol II schwächen, wenn der Strom in ihr noch dieselbe Richtung hätte wie vorher. Die Stromrichtung aber hat ja unterdes gewechselt und infolgedessen verstärkt sie auch jetzt den Südpol, und die vorhergehende und nachfolgende Spule verstärken die gegenüberstehenden Nordpole. Man sieht also, daß der Strom in der Ankerspule, bevor er seine Richtung gewechselt hat, auf den Magnetpol II schwächend, nachdem er seine Richtung geändert hat, verstärkend wirkt (oder umgekehrt), und dasselbe gilt für alle übrigen Spulen und Pole. Während also die Magnetpole sich von einer Spule zur anderen bewegen, bewirkt die Ankerrückwirkung immer während eines Teiles der Zeit Schwächung (Entmagnetisierung), während des Restes der Zeit Verstärkung (Magnetisierung) der Magnete. Wenn nun der Ankerstromkreis bloß aus nicht induktiven Widerständen besteht, so wissen wir (S. 256), daß dann der erzeugte Strom dieselbe Phase hat wie die Spannung. Wenn dann ein Magnetpol sich von einer Spule zur nächsten bewegt, so wird der Ankerstrom entmagnetisierend wirken, bis der halbe Weg zurückgelegt ist, und dann auf der anderen Hälfte des Weges verstärkend wirken. Im Mittel heben sich also die Wirkungen des Ankers auf. Wenn dagegen der Anker induktiv geschlossen ist, dann bleibt der Strom hinter der Spannung zurück, die Dauer des Entmagnetisierens wird verlängert, die des Magnetisierens verkürzt, im Mittel werden also die Magnete geschwächt und es findet eine Spannungsverminderung infolge der Ankerrückwirkung statt. Wenn aber umgekehrt in den Ankerkreis Kapazitäten eingeschaltet sind, so ist der Strom der Spannung voreilend (S. 264 f.), die Magnetisierungsperiode wird verlängert, die Entmagnetisierungsperiode verkürzt und es entsteht das merkwürdige Resultat, daß die Spannung der Maschine durch die Ankerrückwirkung sogar erhöht wird. Es findet eine Spannungserhöhung statt.

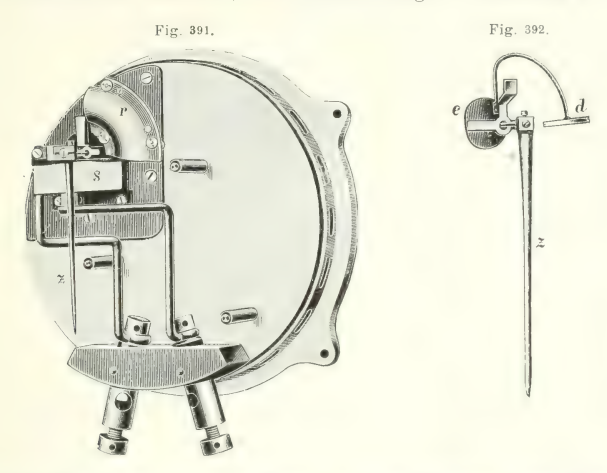
Man muß also in jedem dieser Fälle, wenn man konstante Spannung nach Einschalten des äußeren Stromkreises behalten will, den Erregerstrom der Magnete nachregulieren, nicht bloß wegen des Spannungsverlustes durch den Widerstand und die Selbstinduktion im Anker selbst, sondern auch wegen dieses Spannungsverlustes resp. Spannungsgewinnes durch die Ankerrückwirkung.

Zur Messung der Spannung der Wechsel- und Drehströme, sowie der Stromstärke in den Leitungen werden auch hier Voltmeter und Amperemeter direkt in der Nähe der Maschine angebracht. Und dabei hat man bei gewöhnlichem (einphasigem) Wechselstrom, ganz ebenso wie bei Gleichstrom, nur je ein Voltmeter und ein Amperemeter anzuwenden. Das Voltmeter wird an die Klemmen der Maschine, im Nebenschluß zum Hauptstromkreis angelegt, das Amperemeter kommt direkt in eine Leitung des Hauptstromes. Dagegen bei Drehstrom, wo man drei Leitungen hat, hat man die Spannung zwischen je zweien der drei Leitungen (1 und 2, 1 und 3, 2 und 3) zu messen und die Stromstärke in jedem Zweige. Für den letzteren Zweck hat man also in jede Leitung des Hauptstromes ein Amperemeter einzuschalten. Für die Spannungsmessung hat man ebenso je ein Voltmeter in den Nebenschluß zwischen die Klemmen 1 und 2, 1 und 3, 2 und 3 zu legen.

Die technischen Meßapparate für Wechselströme sind zum Teil die-

selben wie die für Gleichströme. Wenn ein Meßapparat auf der Bewegung eines Stückes von weichem Eisen unter dem Einfluß eines Stromes beruht, so läßt er sich für Wechselströme auch verwenden. Denn das Eisenstückchen wird jedenfalls in die Spule hineingezogen, ob diese nun von einem Strom in der einen oder in der anderen Richtung durchflossen wird, also auch, wenn sie von einem Wechselstrom durchflossen wird. Nur muß die Skala des Instrumentes für den Wechselstrom besonders geeicht sein, und eine solche Skala ist im allgemeinen nur richtig für eine bestimmte Periodenzahl des Wechselstromes, nicht für andere, selbstverständlich wegen des Einflusses der Selbstinduktion. Fig. 391 zeigt einen derartigen Stromzeiger von Siemens & Halske geöffnet, von der Rückseite aus. Man sieht eine aus dicken Kupferbändern gebildete Spule s, in welche der Weicheisenkern eintaucht, der mit einem Zeiger z verbunden ist und

Fig. 391. Fig. 392.



auf einer Stahlachse, die in Saphiren spielt, sich drehen kann. Fig. 392 zeigt den Eisenkern selbst, ein Plättchen aus Weicheisen e, welches mit dem Zeiger z, der vor der Skala spielt, und mit der Dämpferplatte d verbunden ist. Dieser Dämpfer ist derselbe, der S. 245 beschrieben war. Man sieht in Fig. 391 das Messingrohr r, in der sich die Dämpferplatte bewegt. Das Eisenplättchen ist drehbar angebracht, jedoch so, daß die Drehungsachse exzentrisch liegt. Geht ein Strom durch die Spule, so dreht sich daher das Eisenplättchen um seine Achse so weit, bis das Gewicht des Plättchens der elektromagnetischen Kraft das Gleichgewicht hält, und der Zeiger zeigt auf einer Skala, die man geeicht hat, die entsprechende Stromstärke oder, wenn das Instrument im Nebenschluß gebraucht wird, die entsprechende Spannung an.

Diese Instrumente sind, weil die Spulen für den Strom immer Selbstinduktion besitzen, nicht unabhängig von der Periode der Wechselströme. Eine Skala, die für eine Periodenzahl 50 richtig geeicht ist, ist

nicht mehr ganz richtig für 40 oder 80 Perioden in der Sekunde. Unabhängig von der Periodenzahl wird man nur durch Instrumente, welche eine verschwindend kleine Selbstinduktion besitzen. Dies ist der Fall bei den sogenannten Hitzdrahtmeßinstrumenten, welche von Hartmann & Braun in Frankfurt a. M. sowohl für wissenschaftliche als auch für die hier erörterten technischen Messungen konstruiert werden. Diese Apparate beruhen darauf, daß ein Draht, der von einem Strom durchflossen wird — gleichgültig ob von Gleichstrom oder Wechselstrom —, infolge der Jouleschen Wärme erhitzt und dadurch etwas ausgedehnt wird, da ja bei steigender Temperatur alle Körper länger werden. Diese Längenänderung ist nun umgekehrt ein Maß für die Stromstärke, die durch den Draht fließt. Der Hitzdraht besteht bei diesen Instrumenten aus einem kurzen Draht aus Platiniridium, die kleine Verlängerung, die er erfährt, wird in eine Durchbiegungsänderung verwandelt und durch diese wird eine Drehung einer Achse und damit eines Zeigers, der vor einer Skala spielt, bewirkt. Um die sehr kleinen Längenänderungen des „Hitzdrahtes“ so auf den Zeiger zu übertragen, daß dieser dabei eine große Drehung macht, ist die Einrichtung so getroffen, wie sie aus Fig. 393 schematisch hervorgeht. Der dünne Platiniridiumdraht d von 0,03 mm

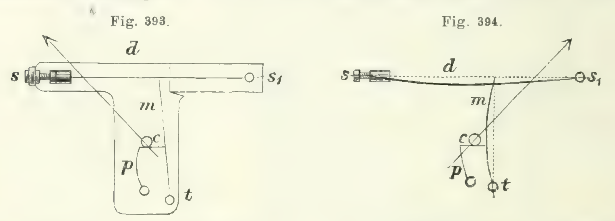


Fig. 393. Fig. 394.

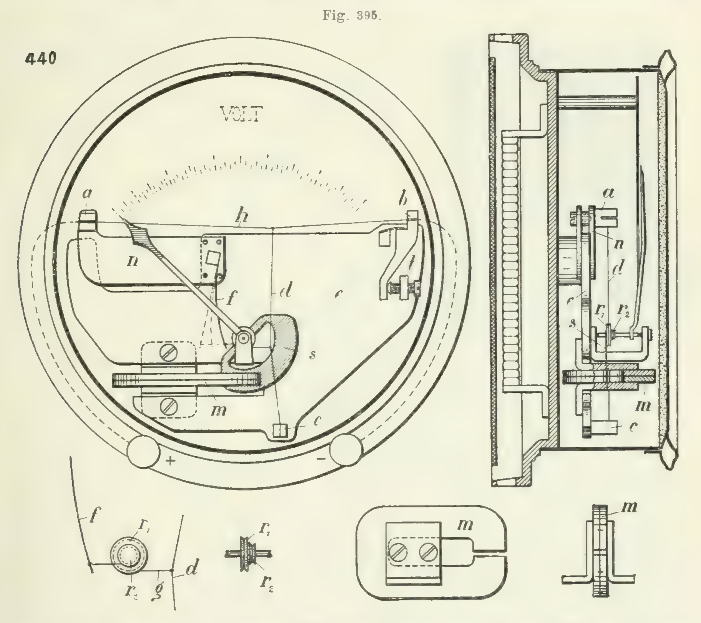
Durchmesser ist an beiden Enden s und s_1 festgeklemmt. Ungefähr in der Mitte des Drahtes ist ein dünner, nicht stromführender Draht m von 0,05 mm Durchmesser befestigt, dessen anderes Ende bei t festgeklemmt ist. Von der Mitte dieses Drahtes, des Brückendrahtes, nun ist ein feiner Kokonfaden um eine drehbare Rolle c geschlungen und zu einer Feder p geführt, welche das ganze System, die beiden Drähte und den Kokonfaden stets gespannt hält. An der Rolle ist der Zeiger befestigt. Wird nun, wie Fig. 394 zeigt, der Draht d von einem Strom durchflossen, also erwärmt und verlängert, so spannt die Feder p ihn und den Draht m, buchtet sie aus, und die Rolle c mit dem Zeiger dreht sich. Wenn man die Stellungen des Zeigers auf der Skala bei bestimmten Stromstärken ermittelt, also das Instrument geeicht hat, so kann man dasselbe zu Messungen benutzen.

Einen genaueren Einblick in die Konstruktion des Instrumentes gewähren die Einzelzeichnungen in Fig. 395. In dieser ist der Hitzdraht mit h bezeichnet, der Brückendraht mit d. Von d aus führt ein Kokonfaden g (in dem unteren Teil der Figur sichtbar) zu einer Rolle r_1 und von der mit ihr verbundenen Rolle r_2 führt ein anderer Kokonfaden zu der Spannfeder f. Damit die normalen Änderungen der Temperatur, die die Länge des Hitzdrahts auch verändern, keinen Einfluß auf die Stellung des Zeigers ausüben, sind die Einspannstücke a und b, an

denen der Hitzdraht eingespannt ist, auf einer aus Eisen und Nickelstahl zusammengesetzten Kompensationsplatte befestigt, deren Ausdehnung bei Temperaturschwankungen die des Hitzdrahts kompensiert. Damit ferner die Schwingungen des Zeigers rasch gedämpft werden, ist an ihm eine Aluminiumplatte s befestigt, welche in dem Spalt zwischen den Polen eines Stahlmagneten m sich bewegt und daher durch Wirbelströme gedämpft wird. Das ganze bewegliche System, Achse, Zeiger, Rollen, Dämpfer, wiegt zusammen nur etwa 0,5 g.

Diese Instrumente lassen sich natürlich für Gleichstrom ebenso brauchen wie für Wechselstrom. Bei letzteren ist die Periodenzahl

Fig. 395.

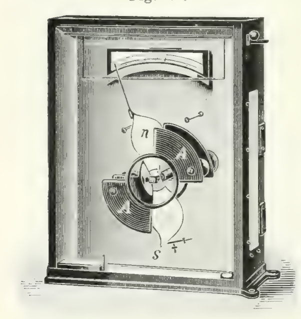


ohne Einfluß, weil der kurze Hitzdraht keine merkliche Selbstinduktion besitzt. Da man durch den dünnen Hitzdraht nur schwache Ströme senden darf, so wird das Instrument zunächst im Nebenschluß als Voltmeter gebraucht, wobei man, wenn die zu messende Spannung hoch ist, noch Vorschaltwiderstände zu dem Instrument legt. Für Strommessungen läßt man den zu messenden Strom durch einen gemessenen kleinen Widerstand gehen und schaltet den Hitzdraht parallel zu diesem, so daß man in Wirklichkeit die Spannung an den Enden eines bekannten kleinen Widerstandes mißt. Da die Stromstärke in diesem Widerstand gleich dieser Spannung dividiert durch den bekannten Widerstand ist, so kann man bei bekanntem Nebenschluß das Instrument gleich in Ampere eichen.

Die äußere Form dieser Instrumente unterscheidet sich nicht wesentlich von der der anderen Schalttafelinstrumente.

Für sehr hohe Spannungen, wie sie jetzt bei Wechselstromanlagen zuweilen benutzt werden, für Spannungen von mehreren Tausend Volt, kann man auch leicht Voltmeter benutzen, welche gar keine Selbstinduktion besitzen, nämlich die gewöhnlichen Elektrometer. Solche Apparate werden in der Technik zuweilen unter dem Namen „elektrostatische Voltmeter“ angewendet, und Fig. 396 zeigt ein solches von Siemens & Halske. Dasselbe ist im Prinzip so wie das Quadrantelektrometer (S. 39) eingerichtet. Es enthält zwei feste, metallische Quadrantenplatten A A, zwischen denen die Nadel n sich um eine horizontale Achse dreht. Die Quadranten sind miteinander fest verbunden. Sie werden mit dem einen Pol der Maschine, die Nadel wird mit dem anderen Pol in Kontakt gebracht. Bei den hohen Spannungen dreht sich die Nadel, sie wird in das Quadrantenpaar hineingezogen. Der Ausschlag hängt von dem Spannungsunterschied der beiden Leitungen ab, mißt also direkt diese Spannung, die man durch Eichen des Instrumentes in Volt ausdrückt. Um für jede Spannungsdifferenz einen bestimmten Ausschlag zu haben, muß eine Gegenkraft der elektrischen Anziehung entgegenwirken. Dies tut hier die Schwerkraft, indem auf den Hebel, der unten an der Nadel bei s sichtbar ist, kleine Gewichte aufgesetzt werden. Je nach diesem Gewicht ist die Empfindlichkeit des Instrumentes verschieden.

Fig. 396.

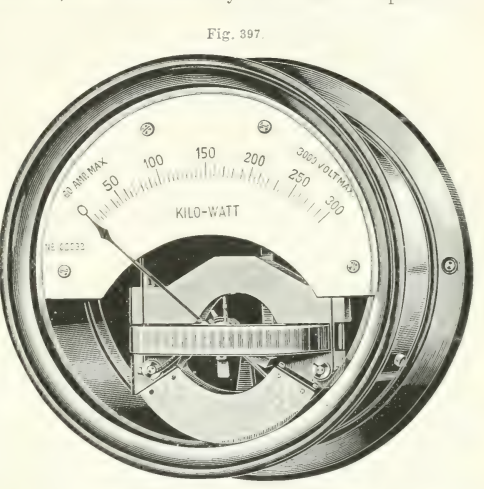


Bei einer Gleichstrommaschine weiß man durch Ablesung des Voltmeters und Amperemeters sofort, wie groß der elektrische Effekt ist, den die Maschine im äußeren Stromkreis erzeugt. Denn dieser Effekt ist einfach das Produkt aus den Ampere und Volt und er ist dann schon in Watt ausgedrückt. Bei einer Wechselstrommaschine aber weiß man, wenn man auch die (effektiven) Volt und Ampere bestimmt hat, noch nicht, wie groß der gelieferte Effekt in Wirklichkeit ist, weil hier noch der Phasenfaktor hinzukommt (S. 256), welcher abhängig ist von der Phasenverschiebung zwischen Strom und Spannung. Man muß also den Effekt einer solchen Maschine noch direkt messen, und das geschieht durch die Wattmeter, von denen wir S. 256 gesprochen haben. Diese beruhen auf dem Prinzip der elektrodynamischen Anziehung zwischen einer im Hauptstrom liegenden und einer im Nebenschluß liegenden Spule, welch letztere an die Enden des Stromstückes angelegt wird, dessen Effekt gemessen werden soll. Bei Wechselstrommaschinen findet man deshalb häufig drei Instrumente angebracht: ein Voltmeter, ein Amperemeter und ein Wattmeter. Bei Drehstrommaschinen braucht man für jeden Zweig solche Apparate, die aber zum Teil verbunden sind, worauf wir hier nicht eingehen können. Fig. 397 zeigt ein solches Wattmeter von Hartmann &

Braun in Frankfurt a. M., welches als Schaltbrettinstrument ausgebildet ist und dessen Skala gleich Kilowatt abzulesen gestattet. Hat man ein Voltmeter, ein Amperemeter und ein Wattmeter zugleich an einer Wechselstromleitung angebracht, so kann man auch sofort den Phasenfaktor bestimmen, den der Stromkreis besitzt. Denn das Produkt aus den abgelesenen Volt und den Ampere multipliziert mit dem Phasenfaktor muß gleich den wirklich gemessenen Watt sein.

Die Wechselströme bieten dem Verständnis weit mehr Schwierigkeiten als die Gleichströme. Sie boten auch zunächst der praktischen Benutzung ziemlich erhebliche Schwierigkeiten. Eine praktisch wichtige Aufgabe ist hauptsächlich die, zwei oder mehr Dynamomaschinen parallel zu schalten, so daß sie zusammen ihren Strom in dasselbe Netz senden. Diese Aufgabe ist für Wechselströme bedeutend schwieriger zu lösen als für Gleichströme. Bei Gleichströmen ist nur notwendig, daß beide Maschinen beim Zusammenschalten dieselbe Klemmenspannung besitzen. Bei Wechselströmen aber ist notwendig, daß sie in jedem Moment dieselbe Spannung besitzen, d. h. daß ihre effektive Spannung, ihre Tourenzahl und ihre Phase im Moment des Zusammenschaltens gleich sind. Um diese drei Bedingungen zu erfüllen, mußte man besondere Vorrichtungen anbringen. Nehmen wir an, daß schon eine oder mehrere Wechselstrommaschinen mit den Sammelschienen eines Schaltbrettes verbunden sind und ihren Strom in das Netz schicken, und daß es darauf ankommt, eine weitere Wechselstrommaschine an die Schienen anzuschließen, so daß sie ihren Strom ebenfalls in das Netz sendet. Um zunächst die effektive Spannung der neuen Maschine gleich der an den Schienen vorhandenen zu machen, braucht man bloß ihr Magnetfeld zu regulieren, wie oben S. 415 angegeben. Damit ferner die Tourenzahl der neu zuzuschaltenden Maschine gleich sei derjenigen der schon vorhandenen, muß man die Tourenzahl der Antriebsmaschinen (Dampfmaschinen, Turbinen) regulieren können. Man tut das vom Schaltbrett aus auf elektrischem Wege, indem man den Regulator dieser Maschinen beeinflußt, so daß ihre Tourenzahl größer oder geringer wird. Endlich muß im Moment des Zuschaltens der neuen Maschine die Phase gleich der vorhandenen sein. Dies erkennt

Fig. 397.



man durch die Phasenindikatoren (Phasenlampen), Lampen, die zwischen die beiden Maschinen geschaltet sind und deren Helligkeit je nach dem Phasenunterschied wechselt, worauf wir aber nicht näher eingehen können. Die Technik des Wechselstromes steht heute der Technik des Gleichstromes vollkommen ebenbürtig da. Zunächst sind, worauf es uns hier ankommt, die Dynamomaschinen für das eine System genau ebenso leistungsfähig wie für das andere System. Beide Arten setzen heute 85 bis 95 Proz. der von Maschinen auf sie übertragenen Arbeit in elektrische Energie um.

Daraus kann man nun sofort die Überlegenheit der Elektrizitätserzeugung in Dynamomaschinen, seien es Gleichstrom- oder Wechselstrommaschinen, gegenüber der in galvanischen Elementen ersehen.

In den galvanischen Elementen wird immer die negative Elektrode, Zink, in der Säure aufgelöst. Jedes Quantum von elektrischer Energie, das man in einem geschlossenen galvanischen Element erhält, ist hervorgebracht durch die Verbrennung (Oxydation) einer äquivalenten Menge Zink in Schwefelsäure. Bei den Dynamomaschinen dagegen werden die elektrischen Ströme hervorgebracht durch die Drehung des Ankers oder der Magnete, also durch die Arbeit, welche man auf die Maschine aufwendet. Dreht man sie durch eine Gasmaschine oder Dampfmaschine, so werden die elektrischen Ströme indirekt hervorgebracht durch die Verbrennung der Kohlen oder des Leuchtgases, welche in den Arbeitsmaschinen zur Verwendung kommen. Es läßt sich eine einfache Rechnung anstellen, welche das Verhältnis der Kosten von elektrischen Strömen, einerseits bei der Erzeugung durch galvanische Elemente, andererseits bei der Erzeugung durch Dynamomaschinen vergleichen läßt, wenn diese durch Dampf- oder Gasmaschinen getrieben werden. Man kann nämlich diese Kosten vergleichen, wenn man annimmt, daß alle Elektrizität, welche eine Dynamomaschine liefert, und ebenso alle, welche ein galvanisches Element liefert, durch den Widerstand in Joulesche Wärme verwandelt wird, und dann diese Wärmemengen vergleicht und ihre bezüglichen Kosten ermittelt. Ein Kilogramm Zink liefert, wenn es vollständig zu Zinksulfat umgewandelt (verbrannt) wird, eine Wärmemenge von 550 Kalorieen (Wärmeeinheiten). Nehmen wir an, daß diese Wärme vollständig in Elektrizität umgesetzt wird, was auch nahezu der Fall sein wird. Ein Kilogramm Kohle dagegen gibt bei der Verbrennung 8000 Kalorieen. Von diesen 8000 Kalorieen werden aber nur etwa 8 Proz. in den Dampfmaschinen faktisch nutzbar verwendet, also 640 Kalorieen, und von diesen 640 Kalorieen, resp. ihrer entsprechenden Arbeit, werden etwa 10 Proz. auf die Überwindung der Reibung der Dynamomaschine und auf unproduktive Erwärmung verwendet, während 90 Proz., also etwa 570 Kalorieen, in Elektrizität verwandelt werden. Ein Kilogramm Zink liefert also eine Menge elektrischer Energie, welche 550 Kalorieen, ein Kilogramm Kohle eine solche, welche 570 Kalorieen entspricht. Nun ist aber der Preis von Zink ungefähr 15mal so hoch als der von Kohle, so daß dieselbe elektrische Energiemenge durch Kohlenverbrennung für weniger als den 15. Teil der Kosten hergestellt wird, als durch Oxydation von Zink.

Damit ist die Überlegenheit der Dynamomaschinen über die galvanischen Elemente für Anwendungen im großen konstatiert.

---

3. Kapitel.

Die Akkumulatoren.

Erst mit Hilfe der Elektrizität ist es gelungen, gewisse technische Aufgaben zu lösen, die mit den früheren Mitteln der Technik stets erfolglos angestrebt wurden. Die beiden hauptsächlichsten derartigen Aufgaben sind die Übertragung von Kraft oder richtiger Arbeit auf weite Entfernungen und die Aufspeicherung von gerade unverwendbarer Arbeit zu späterer Benutzung. Die letztere Aufgabe gerade, ein lang berühmtes Problem der Technik, hat durch die Elektrizität eine sehr vollkommene Lösung erfahren, und zwar durch die Akkumulatoren.

Wenn ein elektrischer Strom, und zwar ein Gleichstrom, durch einen Zersetzungsapparat, ein Voltameter, geschickt wird, in welchem verdünnte Schwefelsäure sich befindet, so wissen wir, daß die Elektroden, z. B. die Platinelektroden, sich polarisieren. An der negativen Elektrode lagert sich Wasserstoff an, an der positiven Sauerstoff. Diese beiden so veränderten Elektroden sind dadurch gegeneinander elektromotorisch wirksam geworden. Sie haben eine Spannungsdifferenz in der verdünnten Schwefelsäure erhalten, und wenn man sie durch einen äußeren Schließungsdraht miteinander verbindet, so fließt daher durch diesen geschlossenen Kreis ein galvanischer Strom, der Polarisationsstrom. Wir haben also durch den elektrischen Strom, den wir hineingesendet haben, den primären Strom, wie man ihn nennt, die Zersetzungszelle gewissermaßen selbst zu einem galvanischen Element gemacht, zu einem Element, das, wie jedes andere, eine ganz bestimmte elektromotorische Kraft hat. Man nennt dann die so polarisierte Zersetzungszelle ein sekundäres Element. Verbindet man die beiden Platinplatten des polarisierten Elements miteinander durch einen äußeren Schließungsdraht, so durchfließt der sekundäre positive Strom das Element in entgegengesetzter Richtung, als es der primäre positive Strom durchflossen hat.

Daraus folgt, daß die elektromotorische Kraft des primären Stromes größer oder mindestens ebenso groß sein muß, als die des vollständig polarisierten sekundären Elements. Solange nämlich die elektromotorische Kraft der primären Batterie unter dieser Grenze liegt, kann die Zersetzungszelle nicht vollständig polarisiert werden, weil sich eben die Ströme dabei noch gegenseitig vollkommen aufheben.

Denken wir uns nun ein sekundäres Element hergestellt und seine Verbindung mit dem primären Strom unterbrochen, dann haben wir ein Element, dessen positive Elektrode für den Strom im Innern der Flüssigkeit das mit Wasserstoff beladene Platin, dessen negative das mit Sauerstoff beladene ist. Sowie nun die Elektroden durch einen äußeren Draht miteinander verbunden werden, also der Stromkreis geschlossen wird, fließt der Strom hindurch, und zwar innen von der wasserstoffbeladenen

Platte zur sauerstoffbeladenen, außen umgekehrt. Dieser Strom übt, wie jeder Strom, auf die Schwefelsäure des Elements seine elektrolytische Wirkung aus. Aus der Schwefelsäure scheidet sich (durch sekundäre Prozesse) Wasserstoff und Sauerstoff ab, und zwar scheidet sich innerhalb des Elements der Wasserstoff an derjenigen Elektrode ab, welche mit Sauerstoff beladen war, der Sauerstoff an derjenigen, welche mit Wasserstoff beladen war. Folglich vermindert sich durch den Strom die Polarisation der Elektroden und daher muß der Strom, den das Element liefert, schließlich aufhören, wenn aller Wasserstoff von der einen und aller Sauerstoff von der anderen Elektrode sich wieder zu Wasser verbunden haben. Je mehr Wasserstoff und Sauerstoff also von dem primären Strom auf den Platinplatten abgelagert wurden, je länger also die Ladung gedauert hat, um so länger hält der Polarisationsstrom an.

Diese Tatsachen, welche wir schon auf S. 150 ff. angeführt haben, gelten nun nicht nur für den Fall, daß Platinelektroden in Schwefelsäure stehen und durch den Strom polarisiert werden. Vielmehr entsteht in jedem Falle, wenn eine Flüssigkeit zwischen zwei gleichen oder ungleichen Elektroden elektrolysiert wird, ein sekundäres Element, das einen Strom liefern kann, und es kommt nur darauf an, die verschiedenen Kombinationen von Flüssigkeiten und Metallen daraufhin zu untersuchen, welche das vorteilhafteste liefern.

Das Verdienst nun, durch sehr viele und sorgfältige Versuche zuerst ein sehr zweckmäßiges sekundäres Element hergestellt zu haben, hat Gaston Planté. Er fand nämlich, daß sich das Blei ganz besonders dafür eigne. Planté tauchte zwei Bleiplatten in verdünnte Schwefelsäure und sendete durch dieses System den primären Strom. Die Bleiplatten überziehen sich schon von selbst beim Stehen in der verdünnten Schwefelsäure mit einer dünnen Schicht von Bleisulfat ($PbSO_4$). Wird nun ein Strom durch die Schwefelsäure gesendet, so zerlegt sich diese in Wasserstoff H_2, und das nicht frei bestehende SO_4. Letzteres tritt an der positiven Elektrode auf. In der wäßrigen Lösung der Schwefelsäure aber verbindet sich dieses SO_4 und zugleich das am Bleisulfat befindliche SO_4 mit dem Wasserstoff von 2 Molekülen des Wassers zu Schwefelsäure $2SO_4H_2$, während die beiden Sauerstoffatome der zerlegten 2 Wassermoleküle sich an das Blei anlagern und Bleisuperoxyd (PbO_2) bilden. An der anderen Elektrode nimmt der auftretende Wasserstoff H_2 dem Bleisulfat das SO_4 fort, bildet mit diesem Schwefelsäure SO_4H_2 und es bleibt reines Blei übrig. Das Resultat der Elektrolyse ist also, daß an derjenigen Bleielektrode, welche mit der negativen Elektrode der primären Batterie verbunden ist, sich reines Blei bildet, während an der positiven Elektrode sich Bleisuperoxyd bildet. Wenn also die Polarisation vollständig ist, ist aus dem System ein galvanisches Element geworden, bestehend aus

Bleisuperoxyd | verdünnte Schwefelsäure | Blei.

Ein solches Element hat, wie jedes andere, eine bestimmte elektromotorische Kraft. Diese ist, wie die Versuche zeigen, gleich 2 Volt. Wenn das Element aber eben erst gebildet ist, so ist die negative Bleielektrode noch mit Wasserstoff bedeckt, dann hat man also das Element:

Bleisuperoxyd | Schwefelsäure | wasserstoffbeladenes Blei

und dessen elektromotorische Kraft ist größer, nämlich gleich 2,2 bis 2,4 Volt.

Wird nun ein solches Element durch einen äußeren Stromkreis geschlossen, so fließt also infolge der elektromotorischen Kraft ein Strom durch den äußeren Stromkreis und durch das Element selbst. Dieser zerlegt durch Elektrolyse wieder die Schwefelsäure, und es bildet sich jetzt an dem Bleisuperoxyd Wasserstoff, während an der reinen Bleiplatte sich Sauerstoff bildet. Dadurch wird das Bleisuperoxyd zu Bleioxyd (PbO) reduziert, aber sofort auch durch die Schwefelsäure in Bleisulfat ($PbSO_4$) umgewandelt, und ebenso wird die reine Bleiplatte zu Bleioxyd oxydiert und gleich in Bleisulfat (schwefelsaures Blei) verwandelt. Der Strom hört auf, wenn beide Platten an der Oberfläche in Bleisulfat verwandelt sind. Die gesamte Menge des zuerst erzeugten Bleisuperoxydes hängt nun ab von der Stärke und Dauer des primären Stromes, also von der gesamten Elektrizitätsmenge, welche während der Ladung des sekundären Elements von dem primären Strom hineingesendet wurde. Die gesamte Elektrizitätsmenge, die das sekundäre Element im ganzen abgeben kann, kann also nicht größer, sondern höchstens gleich sein der gesamten Elektrizitätsmenge, die von dem ladenden Strome hineingegeben wurde.

Um ein solches sekundäres Element herzustellen, genügt es aber nicht, einfach zwei Bleiplatten in verdünnte Schwefelsäure zu tauchen, sie zu laden und dann den Polarisationsstrom zu benutzen. Dieser wäre dann von sehr geringer Dauer und von sehr rasch abnehmender elektromotorischer Kraft. Man muß vielmehr, wie Planté gezeigt hat, das Element erst behandeln, formieren. Es kommt ja darauf an, daß die eine Bleiplatte durch den an sie herantretenden Sauerstoff möglichst vollständig in Bleisuperoxyd verwandelt werde. Der Sauerstoff aber entwickelt sich aus der Schwefelsäure an der Oberfläche des Bleis und greift infolgedessen ganz vorzugsweise zuerst nur die Oberflächenschicht an. Es ist also jedenfalls notwendig, wie es Planté getan hat, den Bleiplatten des sekundären Elements eine große Oberfläche zu geben. Aber man muß auch dafür sorgen, daß der Sauerstoff auch in die Bleiplatte hineindringt und sie auch innen oxydiert. Damit dies nun möglich sei, ist es notwendig, das Blei gewissermaßen aufzulockern, es zu disaggregieren, damit es den Sauerstoff leicht aufnehmen kann. Dies erreichte Planté dadurch, daß er ein Element nicht auf einmal, sondern der Reihe nach an vielen Tagen, sogar monatelang, lud und dann durch Schließung wieder entlud. Dadurch dringt der Sauerstoff von Tag zu Tag etwas tiefer in das Blei ein, und bei jeder neuen Ladung wird dann etwas mehr von der gesamten Masse des Bleis in Superoxyd verwandelt. Ferner erwies sich als vorteilhaft bei der Behandlung, das Element von Tag zu Tag in entgegengesetztem Sinn zu laden. Durch die entgegengesetzte Ladung wird das Bleisuperoxyd wieder zu Blei, und zwar in körniger und poröser Form, so daß bei nachheriger Ladung der Sauerstoff nun leicht bis dahin eindringen kann. In dieser angegebenen Weise behandelte Planté seine Elemente viele Monate lang. Erst dann erreichten sie das Maximum ihrer Wirksamkeit. Nach dieser Behandlung (Formierung), also bei einem fertigen Plantéschen Element, genügt eine einmalige Ladung, um dasselbe in gebrauchsfähigen Zustand zu versetzen.

Ist nun ein solches Plantésches Element geladen, sind also seine Bleielektroden chemisch verändert, so gibt es zu jeder Zeit, wenn man die Elektroden durch einen Schließungskreis verbindet, einen elektrischen Strom, einen Strom, der annähernd im ganzen dieselbe Elektrizitätsmenge mit sich führt, wie der ladende Strom. Solange die Bleielektroden chemisch verändert sind, so lange enthält das Element die Fähigkeit in sich, einen Strom zu liefern. Die chemische Veränderung bleibt nun, wenn das Element ungeschlossen gehalten wird, lange Zeit mehr oder minder vollständig bestehen. Es ist dann also möglich, eine gewisse Elektrizitätsmenge dadurch, daß man sie zum Laden eines Planté-schen Elementes verwendet, gewissermaßen eine Zeitlang aufzubewahren. Die Elektrizität ist in Form von chemischer Veränderung in dem Element aufgespeichert und kann nach einiger Zeit wieder aus demselben herausgezogen werden. Ein solches sekundäres Element ist also gewissermaßen ein Speicher für eine bestimmte Elektrizitätsmenge, es dient zur Aufspeicherung von Elektrizität. Man nennt deshalb auch die sekundären Elemente Akkumulatoren (Sammler).

Die Planteschen Elemente brauchen, wie gesagt, eine umständliche Formierung, bevor sie zum Maximum ihrer Aufnahmefähigkeit kommen, oder wie man es nennt, bevor sie ihre vollständige Kapazität erlangen. Dieses Verfahren suchte Faure auf eine sinnreiche Weise abzukürzen. Er umgab nämlich die beiden Bleielektroden von vornherein mit einer Schicht von Mennige, welche ja an sich schon eine Sauerstoffverbindung des Bleis ist. Die Mennige ist ein lebhaft rotes Pulver, welches gewöhnlich als eine Verbindung von Bleioxyd (PbO) und Bleisuperoxyd (PbO_2) angesehen wird und dem man die Formel gibt Pb_3O_4. Dieses Pulver wurde nun nach Faure mit verdünnter Schwefelsäure zu einem dicken Brei angerieben und auf jede Elektrode dieser Brei aufgestrichen, welcher dann durch einen Filzüberzug auf der Platte festgehalten wurde. Wird nun das Element geladen, so wird auf der positiven Elektrode durch Sauerstoffaufnahme die schwammige Mennige vollständig in Bleisuperoxyd verwandelt (aus $Pb_3O_4 + 2O$ wird $3PbO_2$), während auf der negativen Elektrode die Mennige durch den Wasserstoff zu reinem Blei reduziert wird. Dadurch, daß die Mennige pulverförmig ist, können die Gase mit Leichtigkeit nicht nur an die Oberfläche derselben, sondern auch in das Innere derselben gelangen, und so geht die chemische Veränderung durch den Ladungsstrom rasch vollständig von statten. Nach zwei- bis dreimaliger Ladung und Entladung hat das Element seine vollständige Kapazität erreicht. Ist das aber geschehen, ist die Mennige einmal vollständig zu Bleisuperoxyd auf der einen Elektrode oxydiert und zu reinem Blei auf der anderen Elektrode reduziert worden, und ist das Element einmal entladen, so kann jede neue Ladung es wieder zu seiner vollständigen Wirksamkeit bringen.

Durch diesen Kunstgriff gelang es also Faure, die Behandlung eines Elements bis zur vollständigen Wirksamkeit viel einfacher und kürzer zu gestalten, als es Planté getan hatte. Dafür aber zeigte es sich sehr bald, daß die Haltbarkeit der nach dem Faureschen Verfahren hergestellten Akkumulatoren eine viel geringere war, weil die Pulverschichten von den Platten abfielen, so daß die großen Hoffnungen, die man auf Faures Er-

findung setzte, nicht in Erfüllung gingen, bevor nicht noch viele weitere eingehende Studien zu Hilfe kamen.

Wenn ein Akkumulator formiert ist, so ist seine positive Platte bedeckt mit Bleisuperoxyd, mit der wirksamen Masse, welche schokoladenfarben aussieht, während die negative Platte aus Blei und zwar in aufgelockertem Zustand, Bleischwamm, besteht und grau aussieht. Wird nun das Element geschlossen, geht also der Entladungsstrom durch dasselbe, so wird zunächst durch den an der braunen Elektrode auftretenden Wasserstoff Bleioxyd (PbO) gebildet, nach der Formel

$$PbO_2 + 2H = PbO + H_2O$$

Bleisuperoxyd + 2 Wasserstoff = Bleioxyd + Wasser.

Das Bleioxyd aber verbindet sich sofort mit der Schwefelsäure zu schwefelsaurem Blei ($PbSO_4$) und Wasser nach der Formel

$$PbO + SO_4H_2 = PbSO_4 + H_2O$$

Bleioxyd + Schwefelsäure = Bleisulfat + Wasser.

Im ganzen entstehen also, wenn 2 Atome Wasserstoff (2 H) an die positive Platte herankommen, an dieser Elektrode auch 2 Moleküle Wasser, nämlich zuerst eines bei der Reduktion des Bleisuperoxyds in Bleioxyd und dann noch eines bei der Bildung des Sulfats, also schreibt sich der ganze Vorgang an der positiven Platte

$$PbO_2 + SO_4H_2 + 2H = PbSO_4 + 2H_2O$$

Bleisuperoxyd + Schwefelsäure + 2 Wasserstoff = Bleisulfat + 2 Wasser.

An der negativen Elektrode, dem reinen Blei, entsteht durch den auftretenden Säurerest SO_4 sofort Bleisulfat, nämlich nach der Formel

$$Pb + SO_4 = PbSO_4$$

Blei + Säurerest = Bleisulfat

Der Prozeß bei der Entladung ist also folgender:

1. Ein Molekül Schwefelsäure wird elektrolytisch zerlegt nach der Formel

$$SO_4H_2 = SO_4 + H_2.$$

2. An beiden Elektroden bildet sich Bleisulfat und zugleich treten an der positiven Elektrode 2 Moleküle Wasser in die Lösung ein, die sich also um 2 Moleküle Wasser bereichert, während zugleich die Lösung um 2 Moleküle Schwefelsäure ärmer wird, nämlich erstens um das elektrolytisch zerlegte und zweitens um dasjenige, welches an der positiven Elektrode aufgenommen wurde.

Bei der Entladung wird also die Lösung verdünnt, indem sich der Wassergehalt vermehrt, der Gehalt an Schwefelsäure vermindert.

Bei der folgenden Ladung nun finden wir zwei mit Bleisulfat bedeckte Elektroden. Die Schwefelsäure in der Lösung wird zerlegt und das Resultat ist jetzt das umgekehrte. An der negativen Elektrode tritt Wasserstoff H_2 auf und bildet mit dem Bleisulfat Blei und 1 Molekül Schwefelsäure nach der Formel

$$PbSO_4 + H_2 = Pb + SO_4H_2$$

Bleisulfat + Wasserstoff = Blei + Schwefelsäure.

An der positiven Elektrode verbindet sich der Säurerest mit dem Bleisulfat und 2 Molekülen Wasser aus der Lösung zu Bleisuperoxyd und Schwefelsäure:

$$PbSO_4 + SO_4 + 2\,H_2O = PbO_2 + 2\,SO_4H_2$$

Bleisulfat + Säurerest + 2 Wasser = Bleisuperoxyd + 2 Schwefelsäure.

Daher tritt nach der Ladung wieder Bleisuperoxyd und Blei an den Elektroden auf. Die Lösung der Schwefelsäure ist aber konzentrierter geworden, indem ihr 2 Moleküle Wasser entzogen, dafür aber 2 Moleküle Schwefelsäure (SO_4H_2) zugeführt wurden. Es bilden sich nämlich 3 Moleküle Schwefelsäure, eines an der negativen, zwei an der positiven Elektrode, aber 1 Molekül Schwefelsäure wurde durch den Strom zerlegt.

Wenn auch der Vorgang im einzelnen, nach neueren Theorieen, erheblich komplizierter ist, so ist doch, wenn man den gesamten Akkumulator (d. h. beide Platten und die Schwefelsäure zusammen) ins Auge faßt, sicher bewiesen, daß folgende Prozesse das Endresultat bei der Entladung und Ladung bilden:

Bei der Entladung setzen sich um:

$$PbO_2 + Pb + 2\,H_2SO_4 = 2\,PbSO_4 + 2\,H_2O$$

oder in Worten:

Bleisuperoxyd (an der + Elektrode) + Blei (an der — Elektrode) + 2 Schwefelsäure = 2 Bleisulfat + 2 Wasser.

Es verschwinden also zwei Schwefelsäuremoleküle und es bilden sich 2 Wassermoleküle.

Umgekehrt wird bei der Ladung:

$$2\,PbSO_4 + 2\,H_2O = PbO_2 + Pb + 2\,H_2SO_4$$

2 Bleisulfat + 2 Wasser = Bleisuperoxyd (an + Elektrode) + Blei (an — Elektrode) + 2 Schwefelsäure

Es verschwinden also 2 Wassermoleküle, es bilden sich 2 Schwefelsäuremoleküle und die Platten sind wieder im Anfangszustand.

Man ersieht daraus, daß während der Entladung die verdünnte Schwefelsäure immer verdünnter wird, während sie bei der Ladung wieder konzentrierter wird. Da die konzentrierte Schwefelsäure größeres spezifisches Gewicht hat als die weniger konzentrierte, so kann man durch ein Aräometer, mittels dessen man das spezifische Gewicht bestimmt, immer den Grad der Ladung des Akkumulators fortlaufend kontrollieren.

Von den beiden Platten des Akkumulators bezeichnet man diejenige, auf welcher Bleisuperoxyd abgelagert wird, als die positive, die andere, welche am Ende der Ladung reiner Bleischwamm wird, als die negative. Bei der Ladung ist die positive Platte mit dem positiven Pol der ladenden Batterie zu verbinden. Bei der Entladung geht der positive Strom nach außen von der positiven zur negativen Platte. Bei der Entladung bildet sich an beiden Platten Bleisulfat, das bei der Ladung wieder aufgelöst wird. Bleiben aber die Platten längere Zeit ohne neue Ladung stehen, so wandelt sich das Bleisulfat in eine grobkristallinische Form um, die schwer löslich ist. Man sagt dann, die Platte sei sulfatiert. Die Platten überziehen sich dabei mit einer weißen Schicht. Schädlich ist diese

Sulfatbildung, weil sich lokale Ströme zwischen dem Blei und dem Bleisulfat bilden, welche das wirksame Bleisuperoxyd zerstören, und so die wirksame Schicht vermindern. Dazu kommt noch, daß sich abgefallene Stücke auf dem Boden des Gefäßes sammeln und bald eine leitende Verbindung zwischen den beiden Platten, also einen Kurzschluß bilden. Aus diesem Grunde gingen die ersten Akkumulatoren, die nach dem Faureschen Verfahren hergestellt wurden, rasch zu Grunde und man lernte erst allmählich durch besondere Konstruktion und Anbringung der Bleiplatten dieser Übelstände Herr zu werden.

Ferner zeigte es sich, daß es für die Dauerhaftigkeit und den Nutzeffekt der Akkumulatoren durchaus nicht gleichgültig ist, wie stark die Ströme sind, mit denen sie entladen werden. Es wird ja bei der Entladung das Bleisuperoxyd einerseits und das reine Blei andererseits durch die Aufnahme der Gase, Wasserstoff und Sauerstoff, umgebildet. Hat nun ein Akkumulator eine bestimmte Oberflächengröße seiner Elektroden, so können diese in jedem Zeitabschnitt nur eine bestimmte Menge Gas zu ihrer Umbildung (Reduktion oder Oxydation) brauchen. Wird mehr Gas entwickelt, so dringt das in die Tiefe ein und lockert die wirksame Schicht. Deshalb dürfen die Entladungsströme nicht zu stark sein. Es gibt für jede Plattengröße eine bestimmte maximale Stromstärke, bei welcher entladen werden soll, und diese wird jetzt von den Fabriken immer angegeben.

Die gesamte Elektrizitätsmenge, die in einem bestimmten Akkumulator aufgespeichert ist, bezeichnet man als die Kapazität des Akkumulators. Und zwar versteht man genauer unter der Kapazität eines Akkumulators die gesamte Elektrizitätsmenge, welche der Akkumulator in Form von Strom bei der Entladung abgeben kann. Man drückt diese gewöhnlich in Amperestunden aus. Ein Element z. B., welches eine Kapazität von 600 Amperestunden hat bei einer höchstzulässigen Stromstärke von 60 Ampere, kann diesen Strom von 60 Ampere 10 Stunden lang geben. Bei geringerer Stromstärke der Entladung wird die Kapazität nicht unbeträchtlich größer. So kann dasselbe Element einen Strom von 30 Ampere nicht bloß 20 Stunden lang, sondern etwa 22 Stunden lang liefern.

Wie viel Elektrizität in einem Akkumulator aufgespeichert werden kann, wie groß also seine Kapazität ist, das hängt natürlich von der Größe seiner Platten ab. Eine wesentlichere Frage ist aber die, wie viel von der aufgespeicherten elektrischen Energie bei der Entladung wieder nutzbar abgegeben werden kann. Das Verhältnis der abgegebenen zur aufgewendeten Energie nennt man den Nutzeffekt des Akkumulators. Dieser Nutzeffekt wird um so größer, je besser präpariert das Element ist.

Um die Menge der aufgespeicherten Energie zu finden, bestimmt man die Spannung an den Polen des Elements während der Ladung und die Stärke des Stromes, mit dem man ladet. Das Produkt dieser Größen gibt die in jeder Sekunde auf den Akkumulator übertragene elektrische Energie in Watt. Diese, multipliziert mit der gesamten Ladungszeit, gibt die gesamte aufgespeicherte Energie. Man drückt diese gewöhnlich in Wattstunden aus, indem man den Effekt in Watt mit der Ladungszeit in Stunden multipliziert.

Ebenso bestimmt man die bei der Entladung des Akkumulators abgegebene Energie als das Produkt aus der Spannung des Akkumulators bei der Entladung, der Stromstärke bei der Entladung und der Entladungszeit. Auch diese Energie wird in Wattstunden ausgedrückt. Das Verhältnis der Zahl Wattstunden bei der Entladung zu der bei der Ladung ist also der N u t z e f f e k t des Akkumulators.

Ein Beispiel wird diese Berechnung klar machen. Einer von den unten beschriebenen Hagener Akkumulatoren wurde 4 Stunden 5 Minuten lang mit einem Strom von 36 Ampere geladen. Die mittlere Spannung des Akkumulators war dabei 2,15 Volt. Mithin war die aufgespeicherte Energie:

$$4{,}08 \times 2{,}15 \times 36 = 315{,}8 \text{ Wattstunden.}$$

Bei der Entladung hatte der Akkumulator eine Spannung von 1,88 Volt im Mittel und wurde auch mit einer Stromstärke von 36 Ampere entladen. Diese Entladung dauerte so lange, als der Akkumulator noch nutzbare Arbeit liefern konnte, und zwar waren dies 3,5 Stunden. Mithin war die abgegebene Energie:

$$3{,}5 \times 1{,}88 \times 36 = 236{,}9 \text{ Wattstunden.}$$

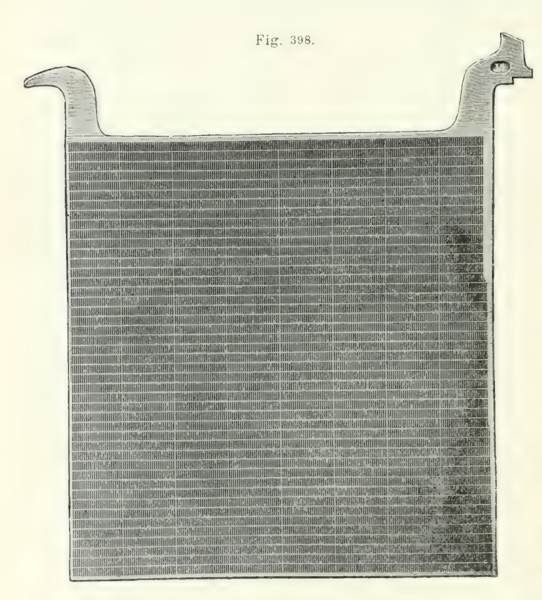


Fig. 398.

Das Verhältnis beider, nämlich hier

$$\frac{236{,}9}{315{,}8} = 0{,}75,$$

gibt den Nutzeffekt des Akkumulators, der also hier 75 Proz. beträgt.

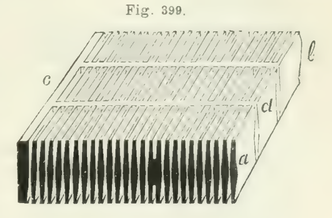
Die vielfachen Anstrengungen, die Akkumulatoren zu verbessern, ihren Nutzeffekt und ihre Haltbarkeit zu erhöhen, haben allmählich zu dem Resultat geführt, daß man leicht und sicher 70 bis 75 Proz. der eingeführten Arbeit von den Akkumulatoren wieder erhält.

Dabei beruhen die verschiedenen Herstellungsweisen, die man für die Akkumulatorplatten angewendet hat, im wesentlichen auf dem Verfahren von Planté und auf dem von Faure, die man zweckmäßig kombiniert.

Die Fauresche Präparation mit Mennige zeigte den Übelstand, daß die Mennige leicht von den Bleiplatten abfiel. Dieses lernte man allmählich dadurch vermeiden, daß man die Platten gitterförmig machte.

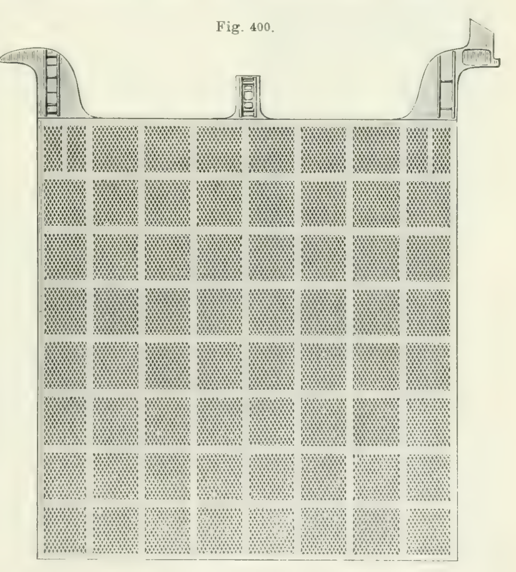
Am meisten verbreitet sind in der ganzen Welt und namentlich in Deutschland die Hagener Akkumulatoren, welche von der Akkumulatorenfabrik in Berlin und Hagen i. W. fabriziert werden und welche sich durch großen Nutzeffekt und sehr große Haltbarkeit auszeichnen. Die Bleiplatten dieser Elemente sind nach dem Verfahren von Planté formiert.

Fig. 399.



Da es von erheblichem Vorteil ist, die wirksame Oberfläche einer Platte möglichst groß zu machen, so wird jede positive Platte aus engen und hohen Rippen gebildet, die durch Querrippen zusammengehalten werden. Fig. 398 zeigt eine solche Platte mit ihren schmalen Längsrippen und breiten Querrippen, während Fig. 399 ein Stück einer solchen Platte in natürlicher Größe darstellt. In der letzteren sind a b die Längsrippen, d c die Querrippen. Die wirksame Oberfläche dieser sogenannten I-Platten ist achtmal so groß, als die Oberfläche der massiven Platte wäre. Die Säure kann hierbei die ganze wirksame Oberfläche bespülen, so daß diese nach dem Plantéschen Verfahren formiert werden kann.

Fig. 400.



Die negativen I-Platten bestehen, wie Fig. 400 zeigt, aus einem weitmaschigen Gitter. In die Maschen wird Bleiglätte gefüllt, welche bei der Ladung vollständig in Bleischwamm umgewandelt wird. Da der Bleischwamm aber allmählich von selbst zusammensintert, so werden ihm gewisse Stoffe beigemischt, welche das Sintern verhindern und sogar ein Quellen her-

vorrufen. Damit nun die Masse dabei nicht aus den Maschen herausfällt, werden die negativen Platten mit einem perforierten Bleiblech umgeben, wie Fig. 401 in einem Abschnitt in natürlicher Größe zeigt. Diese Platten werden als *Kastenplatten* bezeichnet.

Die Bleiplatten werden gleich in der Form gegossen, daß sie rechts und links je eine vorspringende Nase haben, mit denen sie dann in die Gefäße eingehängt werden.

Eine Zahl formierter positiver und eine Zahl negativer Platten, je miteinander verlötet, werden nun in ein Gefäß aus Holz oder Glas gebracht, das mit verdünnter Schwefelsäure gefüllt ist. Dabei wird immer von den negativen Platten eine mehr genommen, so daß jede positive Platte zwischen zwei negativen hängt.

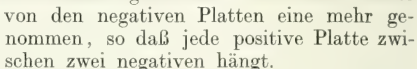


Fig. 401.

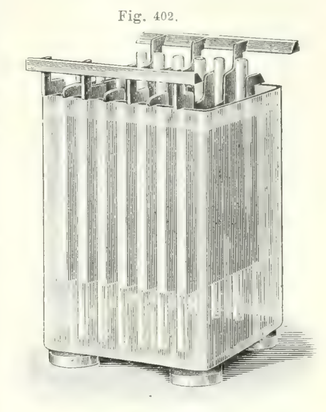
Fig. 402 zeigt einen solchen Akkumulator in einem Glasgefäß. Die Platten (hier 3 positive und 4 negative) sitzen alle mit den Nasen auf dem Rand des Gefäßes auf. Je zwei benachbarte Platten sind durch zwischengeschobene Glasröhren an der Berührung gehindert und voneinander isoliert. Zwischen die Platten werden in neuerer Zeit dünne präparierte Holzbrettchen gebracht, welche durch ihre Präparierung das Sulfatieren der Platten möglichst lange verhindern sollen.

Die Bleileiste der negativen Platten der einen Zelle ist so lang, daß sie, wie Fig. 403 zeigt, gleichzeitig die positiven Platten der nächsten Zelle aufnimmt. Die Verbindung der Platten geschieht nur durch Löten. Vielplattige Akkumulatoren werden in Holzgefäßen montiert, die mit Blei ausgeschlagen sind.

Je nach der Größe der Platten ist für jeden Akkumulator eine bestimmte maximale Stromstärke beim Laden und Entladen vorgeschrieben. Wird ein solcher Akkumulator mit der vorgeschriebenen Stromstärke geladen, so erhält er wenige Minuten nach Beginn der Ladung eine Spannung von 2,09 Volt. Diese Spannung bleibt ungefähr 6 Stunden lang während der Ladung dieselbe, um dann während der nächsten 4 Stunden langsam auf 2,75 Volt zu steigen. (Diese Änderung rührt natürlich von den Veränderungen der Säure her.) Wenn dieser Wert der Spannung erreicht ist, muß die Ladung aufhören, da weitere Ladung nutzlose Gasentwickelung hervorbringt. Wird dann die Entladung vorgenommen, so ist die Anfangsspannung bei der Entladung 1,95 Volt. Daß dieser Wert so viel kleiner ist als der bei der Ladung erreichte, kommt daher, daß bei der Ladung in unmittelbarer Nähe der Elektroden und in deren Poren die Konzentration der Schwefelsäure eine sehr hohe ist. Die elektromotorische Kraft der

Akkumulatoren wächst nämlich mit der Konzentration der Säure. Bei der Entladung wird, wie wir gesehen haben, diese Säure verbraucht, so daß daraus die niedrigere Spannung resultiert. Der Grund dieser Verschiedenheit der Spannungen ist also ein sekundärer. Bei normalem Entladungsstrom bleibt die Spannung lange Zeit auf 1,95 Volt und sinkt dann allmählich auf den Wert 1,80 Volt herab. Wenn dieser Wert erreicht ist, muß man die Entladung abbrechen und die Akkumulatoren frisch laden.

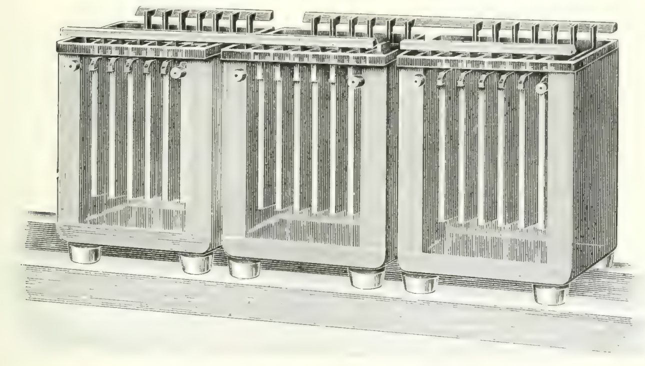
Fig. 402.



Die K a p a z i t ä t einer einzelnen Akkumulatorenzelle ist um so größer, je größer ihre Platten sind und je mehr miteinander verbundene, also nebeneinander geschaltete Platten sie enthält. Sind mehrere gleiche Zellen zu einer Batterie hintereinander geschaltet, wie in der Fig. 403, so ist die Kapazität der Batterie (in Amperestunden) doch bloß gleich der Kapazität einer einzigen Zelle. Durch die Hintereinanderschaltung wird nur die Spannung der Batterie, also die Spannung des Stromes vergrößert, aber nicht die Kapazität im ganzen. Fließt nämlich z. B. bei einer Batterie von 10 hintereinander geschalteten Akkumulatoren ein Strom von 8 Ampere durch den äußeren Schließungs-

Fig. 403.





kreis, so fließt derselbe Strom auch in jeder Zelle, und in jeder Zelle wird pro Sekunde die gleiche Menge Bleisuperoxyd durch den auftretenden Waserstoff reduziert. Hat also z. B. jede Zelle die Kapazität von 40 Amperestunden, so ist nach 5 Stunden die ganze Batterie er-

schöpft, da jede einzelne Zelle erschöpft ist. Der Strom von 8 Ampere hat aber hier die Spannung von 20 Volt ungefähr, während er bei einer einzigen Zelle nur die Spannung von 2 Volt hätte. Die Batterie hat also $20 \cdot 40 = 800$ Wattstunden Effekt, während jede einzelne Zelle 80 Wattstunden aufgespeichert enthält.

Die Akkumulatoren halten am besten, wenn sie mit der vorgeschriebenen Stromstärke geladen und entladen werden. Aber es schadet ihnen auch nicht sehr, wenn man sie mit höherer Stromstärke entladet. Nur darf man darin nicht zu weit gehen. Ein Kurzschluß, d. h. eine Entladung mit sehr großer Stromstärke, ruiniert die Platten. Die Platten sind durch die Fortschritte in der Fabrikation jetzt so leistungsfähig geworden, daß sie, ohne Schaden zu nehmen, viel stärkere Ströme bei gleicher Größe vertragen, als früher. Aber allerdings nimmt mit wachsender Entladungsstromstärke die Kapazität erheblich ab. Die Platten werden alle für eine Entladungszeit von 1 bis 10 Stunden konstruiert. So liefert z. B. der kleinste Akkumulator, der mit 9 Ampere geladen wird, bei einer Entladungsstromstärke von 4,5 Ampere den Strom 7,5 Stunden lang, hat also eine Kapazität von 33 Amperestunden. Wird er dagegen mit 6 Ampere entladen, so liefert er den Strom bloß 5 Stunden, hat also bloß 30 Amperestunden Kapazität. Bei einer Entladungsstromstärke von 9 Ampere liefert er den Strom 3 Stunden lang, bei 11 Ampere 2 Stunden lang und bei 19 Ampere 1 Stunde lang. Seine Kapazität sinkt also auf 27, 22 und 19 Amperestunden, also fast auf die Hälfte, während die Stromstärke von 4,5 bis 19 Ampere steigt. Für den größten fabrizierten Akkumulator, der Ströme von mehreren Tausend Ampere liefert, fällt die Kapazität entsprechend von 18 865 auf 10 431 Amperestunden, wenn die Entladungszeit von 7,5 bis 1 Stunde sinkt, wobei aber die Stromstärke von 2500 auf 10 500 Ampere steigt.

Es ist von Interesse, die in einem Akkumulator aufgespeicherte nutzbare Energie mit seinem Gewicht zu vergleichen. Die aufgespeicherte Energie erhält man, wenn man die Kapazität der Zelle in Amperestunden mit der Spannung der Zelle in Volt (die rund gleich 2 Volt ist) multipliziert. Sie ist dann in Wattstunden ausgedrückt. Da die Kapazität veränderlich ist, so ist es auch die Energie. Sie ist kleiner für rasche Entladung als für langsame. So liefern unsere beiden oben betrachteten Akkumulatoren bei einstündiger Entladung 38 resp. 20 860 Wattstunden, bei langsamer $7\,{}^1/_2$stündiger Entladung 67 resp. 37 730 Wattstunden. Nun hat die erste Zelle mit Säure ein Gewicht von 12,6 Kilo, die letztere ein solches von 3726 Kilo. Folglich enthält die kleine Zelle pro Kilo 3 bis 5 Wattstunden nutzbar aufgespeichert, die große pro Kilo $5\,{}^1/_2$ bis 10 Wattstunden, je nachdem man mit sehr großer oder geringer Stromstärke entladet. Das ist eine verhältnismäßig sehr geringe Arbeitsansammlung pro Kilogramm Gewicht. In der Tat gelten auch die oben angeführten Zahlen für Akkumulatoren, welche feststehen, sogenannte stationäre Akkumulatoren, bei denen es auf die Größe des Gewichtes nicht sehr ankommt.

Da jedoch in den letzten Jahren das Bedürfnis nach fahrbaren und tragbaren Akkumulatoren immer größer wurde, so bemühen sich die verschiedenen Fabriken, das Gewicht derselben bei gleicher Kapazität möglichst zu reduzieren. Namentlich der große Aufschwung des Automobilis-

mus hat das Bestreben, die Elektrizität auch für solche Kraftfahrzeuge nutzbar zu machen, besonders angeregt. Die Vorbedingung dafür sind aber Akkumulatoren, die pro Kilo Gewicht sehr viel mehr nutzbare Wattstunden enthalten, als die oben angeführten. Denn die Akkumulatoren müssen von dem Automobil mitgeschleppt werden, um diesem die nötige Triebkraft für den elektrischen Motor zu bieten. In dieser Richtung nun, das Gewicht der Akkumulatoren pro Wattstunde möglichst zu reduzieren, ist man schon bei den Bleiakkumulatoren erheblich vorangekommen. Die Hagener Fabrik baut Akkumulatoren für Automobilzwecke, welche aus besonders dünnen Platten bestehen, deren Gitter mit der aktiven Masse gefüllt sind. Von diesen Elementen liefert z. B. das kleinste einen Entladestrom von 11 Ampere, wobei es eine Kapazität von 53 Amperestunden, also einen Effekt von 106 Wattstunden besitzt. Da

Fig. 404.

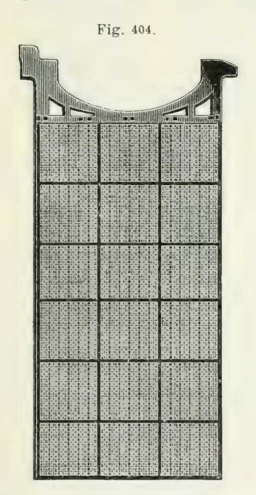
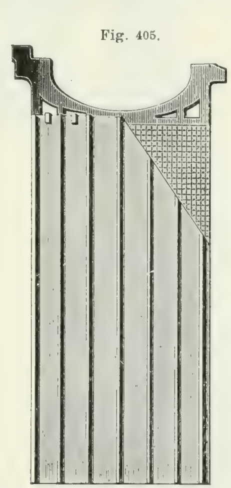


Fig. 405.

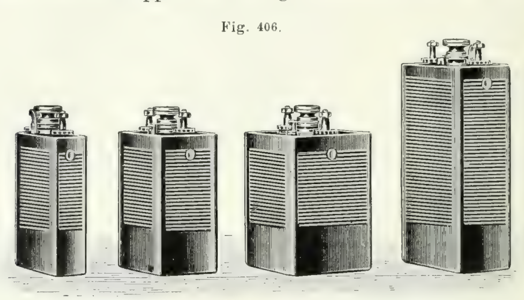


das Element gefüllt 3,8 Kilo wiegt, so kommen auf das Kilo 28 Wattstunden. Größere Elemente, die 78 Ampere Entladungsstrom geben und dabei eine Kapazität von 390 Amperestunden besitzen, wiegen gefüllt 25,6 Kilo, so daß pro Kilo 30 Wattstunden nutzbar abgegeben werden können. Bei dieser Anhäufung von disponibler Arbeit pro Kilo ist der Betrieb von Automobilen bereits ein rentabler und in der Tat erobern die elektrischen Automobile im Stadtverkehr immer weitere Kreise.

Außer von der Akkumulatorenfabrik in Hagen und Berlin werden noch von anderen Firmen Akkumulatoren hergestellt, wobei die hauptsächlichsten Konstruktionen sich nicht wesentlich unterscheiden. So stellt z. B. auch die Firma Gottfried Hagen in Kalk bei Köln neuerdings ihre negativen Platten, die, wie Fig. 404 zeigt, ein engmaschiges Gitter bilden, derart her, daß der aktiven Masse Stoffe zugesetzt werden, welche das Zusammensintern des Bleies verhindern und im Gegenteil ein Auflockern

desselben verursachen. Um aber das dabei mögliche Herausfallen der Bleisalze aus den Gittern zu verhindern, werden die Platten mit einer gelochten Hartgummiplatte umgeben, wie Fig. 405 zeigt, welche so feine Löcher hat, daß die Säure leicht zirkulieren kann, ohne daß ein Durchtreiben der Salze durch die Löcher vorkommen kann. Auf die Hartgummiplatten werden Rippen aus Hartgummi aufvulkanisiert, wie es die

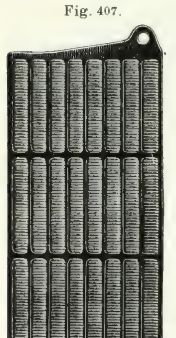
Fig. 406.



letzte Figur zeigt, und diese bilden an Stelle der sonst üblichen Glasröhren die elektrische Trennung der einzelnen Platten.

Andere brauchbare Akkumulatoren als solche mit Bleiplatten hat man sich vielfach zu konstruieren bemüht. Einen Erfolg hat darin bis jetzt nur Edison gehabt, der einen auf ganz anderen chemischen Vorgängen basierenden Akkumulator erfunden hat, zunächst gerade mit der Absicht, eine leichtere Zelle zu bauen, die für den Automobilbetrieb besonders vorteilhaft wäre. Diese Akkumulatoren werden von der Deutschen Edison-Akkumulatoren-Company in Berlin verbreitet und sie besitzen eine Reihe von Annehmlichkeiten, die den Akkumulatoren bisher abgingen.

Fig. 407.



Der Edisonakkumulator ist eine Nickeleisenzelle mit 21prozentiger Kalilauge als Flüssigkeit. In Fig. 406 sind 4 Typen dieser Akkumulatoren dargestellt. Sie bestehen aus einem Kästchen aus vernickeltem gerippten Eisenblech, sind daher unzerbrechlich. Im Innern des Kästchens sind die Elektroden, die aus dünnen Platten aus Stahlblech bestehen, welche nur als Träger der wirksamen Massen dienen. In diese Platten sind rechteckige Löcher, Fenster, eingeschnitten, welche von Kästchen aus sehr dünnem Stahl ausgefüllt werden, die nun die wirksamen Massen enthalten, und zwar werden diese Massen in Form von Briketts in die Kästchen gelegt und das Ganze, Blech mit Kästchen und Briketts, unter hohem Druck zusammengepreßt. Fig. 407 zeigt eine solche Elektrode mit 24 Kästchen. Die Briketts auf der einen Platte bestehen aus sehr fein gepulvertem Eisenoxyd und Quecksilberoxyd, die der anderen Platte aus fein ge-

pulvertem Nickelhydrat, dem Graphit beigemengt ist. Wenn nun ein Strom durch die Flüssigkeit gesendet wird, so zerlegt dieser zwei Moleküle Kalilauge (KOH) und es tritt an der Nickelelektrode Sauerstoff auf, welcher die Nickelverbindung in Nickelsuperoxyd verwandelt, während an der Eisenelektrode die dortige Eisenverbindung reduziert wird; zugleich bilden sich die zwei Moleküle Kalilauge wieder, indem an der Eisenelektrode ein Wassermolekül zersetzt, an der Nickelelektrode eines gebildet wird. Das Resultat ist also, daß die Flüssigkeit sich gar nicht ändert, sondern daß nur dem Eisen ein Sauerstoffatom weggenommen und dieses dem Nickel zugeführt ist. Ist die Zelle nun geladen und verbindet man jetzt die Elektroden, so fließt der Entladungsstrom, der umgekehrt das Nickel wieder reduziert, das Eisen oxydiert. Die Nickelelektrode ist für den Entladungsstrom die positive. Da die Flüssigkeit nicht verändert wird, sondern nur als Überträger dient, so kann ihre Menge sehr gering genommen werden. Die elektromotorische Kraft einer Zelle bei der Entladung ist 1,23 Volt. Diese ist zwar bedeutend kleiner als bei Bleielektroden. Aber anderseits kann diese Zelle bei gleicher Plattengröße einen sehr viel stärkeren Entladungsstrom vertragen. Ferner kann die Zelle wochen- und monatelang geladen stehen bleiben, ohne daß unerwünschte Nebenprozesse eintreten. Weiter ist die Kapazität dieser Zellen unabhängig von der Stärke des Entladungsstromes. Die oben abgebildeten 4 Zellen werden je $3^3/_4$ Stunden mit 7,5, 15, 22 und 30 Ampere geladen und erlauben bei der Entladung 5, 10, 15, 20 Ampere zu entnehmen, wobei sie diesen Strom auch wieder etwa $3^1/_2$ Stunden lang liefern. Infolgedessen stellt sich die aufgespeicherte Energie pro Kilo (die obigen Zellen wiegen gefüllt 1,6, 2,6, 3,8, 4,4 Kilo) auf ca. 20 bis 25 Wattstunden.

Fig. 408

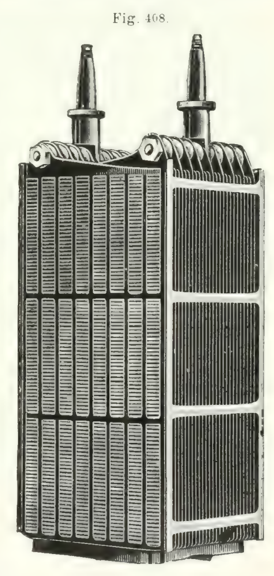
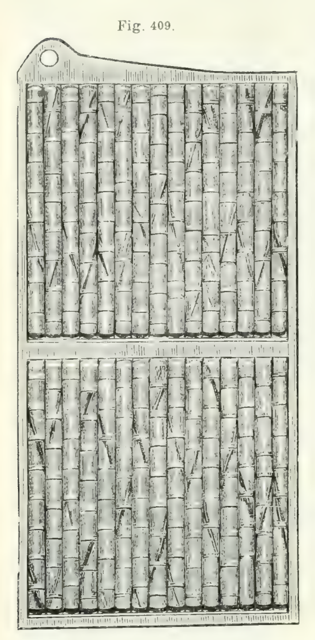


Fig. 408 stellt einen vollständigen Plattensatz einer Zelle Type H dar. An dem Plattensatz sind zugleich auch die nach außen führenden Elektroden zu sehen.

Um die aufgespeicherte Energie pro Kilo Gewicht noch zu erhöhen, hat Edison in jüngster Zeit sowohl die Form der Platte wie ihre Beschickung verändert. Die neue Type wird als Type A bezeichnet. Die negativen Platten enthalten nach wie vor die flachen Kästchen mit dem Inhalt von Eisenoxyd und Quecksilberoxyd. Dagegen werden die positiven Platten, wie Fig. 409 zeigt, jetzt aus dünnen Rohren aus durchlöchertem Eisenblech hergestellt und der Inhalt derselben besteht aus Nickelhydrat mit einem reichlichen Zusatz von dünnen Nickelflocken. Durch diese Änderungen ist die Kapazität dieser Zellen bei gleichem Gewicht um 25 Proz. gestiegen, so daß jetzt pro Kilogramm Gewicht ca. 30 Wattstunden aufgespeichert werden.

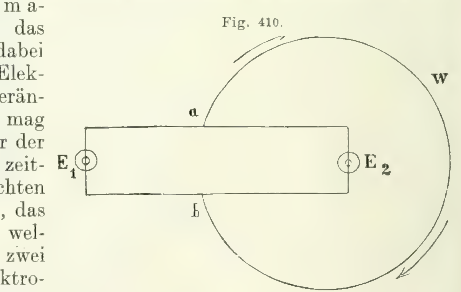
Die Edisonzellen sind daher in Bezug auf die Größe der aufgespeicherten Arbeit den leichten Bleiakkumulatoren mindestens gleichwertig und da sie sich durch solide und elegante Bauart auszeichnen und praktisch unverwüstlich sind, so erobern sie sich dauernd neue Gebiete der Anwendung, namentlich beim Betrieb von elektrischen Automobilen und Booten.

Fig. 409.



Zur Ladung von Akkumulatoren kann man natürlich nur Gleichstrommaschinen nehmen, und zwar am besten Nebenschlußdynamos. Da nämlich der Akkumulatorenstrom dem Maschinenstrom bei der Ladung entgegenfließt, so wird der Akkumulator nur dadurch geladen, daß die Dynamomaschine eine höhere elektromotorische Kraft hat als der Akkumulator. Wenn aus irgend einem Grunde, z. B. durch Nachlassen der Geschwindigkeit des Gasmotors, durch Gleiten eines Riemens u. s. w., die Geschwindigkeit der Dynamomaschine sich verringert, also auch ihre elektromotorische Kraft abnimmt, so kann es vorkommen, daß momentan der Akkumulatorenstrom überwiegt. Dann werden aber bei Hauptstrommaschinen und bei Compoundmaschinen sofort die Magnete der Maschine ummagnetisiert und diese bleiben dann ummagnetisiert, auch wenn sich die Geschwindigkeit der Dynamomaschine wieder erhöht. Der Strom fließt dann also in umgekehrter Richtung durch den Akkumulator, und statt ihn zu laden, entladet er ihn. Bei Nebenschlußmaschinen aber kann das nicht stattfinden, denn dabei bleibt der Strom um die Elektromagnete immer unverändert in seiner Richtung, mag nun der Maschinen- oder der Akkumulatorenstrom zeitweise überwiegen. Betrachten wir, um das einzusehen, das Schema in Fig. 410, in welchem bei E_1 und E_2 zwei verschieden starke elektromotorische Kräfte wirken.

Fig. 410.

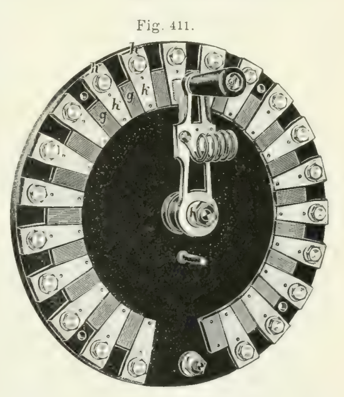


Bei a und b zweige sich ein Widerstand w ab. (E_1 ist der Akkumulator, E_2 der Anker der Dynamomaschine, w die Magnetbewickelung

der Maschine.) Ist nun E_2 stärker als E_1 und fließt der positive Strom von E_2 über a nach E_1, so hat a positive Spannung, b negative. In w fließt also der Strom in Richtung des Pfeiles. Ist umgekehrt E_1 stärker als E_2, so fließt zwischen E_1 und E_2 der Strom in entgegengesetzter Richtung, von E_1 über a nach E_2. Folglich hat auch dann wieder a positive Spannung, b negative und folglich fließt der Strom in w wiederum in Richtung des Pfeiles wie früher. Welche elektromotorische Kraft auch überwiege, die der Maschine oder die des Akkumulators, stets fließt im Draht w, d. h. hier um die Magnete, der Strom in derselben Richtung. Der Strom der Maschine kehrt sich mithin nicht dauernd um, wenn er auch zuweilen durch Geschwindigkeitsschwankungen sich momentan umkehren kann.

Bei jeder Anlage von Akkumulatoren muß nun zunächst eine Schaltung eingerichtet werden, welche es ermöglicht, einerseits die Akkumulatoren mit einer Dynamomaschine so in Verbindung zu bringen, daß die ersteren geladen werden, und andererseits die Akkumulatorenbatterie mit denjenigen Apparaten (Glühlampen, Bogenlampen oder Elektromotoren etc.) zu verbinden, in welche sie den Strom abgeben soll. Und zwar sollen diese Verbindungen einfach durch bloße Umdrehung eines Hebels oder Umschaltung eines Stöpsels ausgeführt werden können. Ferner muß sowohl für die Ladung als für die Entladung ein Amperemeter vorhanden sein, und ein Spannungsmesser (Voltmeter), welche beiden Apparate stets anzeigen, ob der Akkumulator in Ordnung ist. Zur Regulierung der Stromstärke braucht man ferner noch einen Regulierwiderstand, der für die im allgemeinen starken Ströme eingerichtet sein muß. Und endlich, wenn es sich bei großen Anlagen darum handelt, die Spannung an den Enden der Akkumulatorenbatterie dauernd konstant zu halten, obwohl die Spannung jeder einzelnen Zelle allmählich abnimmt, gehört noch ein sogenannter Zellenschalter dazu, welcher neue Zellen ein- und ausschaltet. Wenn nämlich z. B. 60 Akkumulatoren vorhanden sind und die Spannung, welche für die Lampen etc. gebraucht wird, 110 Volt betragen soll, so werden im Anfang, wo jede Zelle 1,95 Volt Spannung hat, nur 56 Zellen einzuschalten sein, wenn aber dann die Spannung jeder Zelle auf 1,80 Volt abgenommen hat, so werden 60 Zellen einzuschalten sein. Diese Zuschaltung wird durch den Zellenschalter entweder mit der Hand oder automatisch besorgt.

Fig. 411.



Die Zellenschalter bestehen, äußerlich angesehen, wie Fig. 411 (Zellenschalter von Dr. Paul Meyer, A.G., Berlin) zeigt, aus einer Reihe von Kontaktstücken k k, welche gewöhnlich im Kreise auf einer Schieferplatte angebracht sind und auf welchen ein Kontakthebel verschoben werden kann. Jede von den abzuschaltenden oder zuzuschaltenden Zellen steht

durch einen Draht mit einem der Kontaktstücke in Verbindung. Die Kontaktstücke sind voneinander durch isolierende Glasstücke g g getrennt.

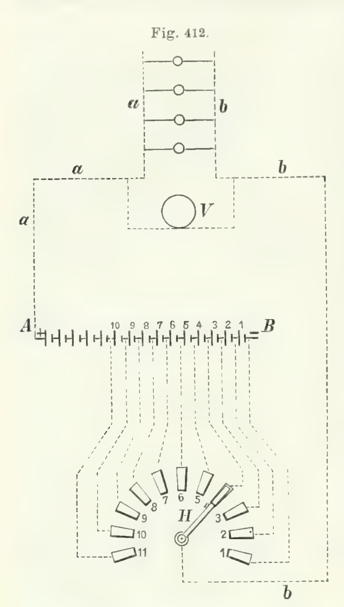


Fig. 412.

Wie der Zellenschalter wirkt, das geht am besten aus der Fig. 412 hervor, in welcher eine Akkumulatorenbatterie AB gezeichnet ist, von der die letzten 10 Zellen durch je einen Draht mit den Kontaktstücken des Zellenschalters verbunden sind. Der eine Hauptleitungsdraht a in die äußere Leitung (Lampen in der Figur) geht vom Anfang A (+ Pol) der Batterie aus, der andere b von dem Kontakthebel H des Zellenschalters. Bei der in der Figur gezeichneten Stellung sieht man nun, daß alle Zellen von A an bis zur Zelle 4 den Strom in die Leitung senden, während die Zellen 1, 2, 3 abgeschaltet sind. V ist ein Voltmeter.

Will man eine Akkumulatorenbatterie laden, während man zugleich von ihr Strom (etwa für Glühlampen) abnimmt, so muß man zwei Zellenschalter anwenden, deren erster die eben erörterte Funktion hat, die Spannung für die Lichtleitung konstant zu erhalten, während der andere diejenigen Zellen, welche für die Lichtleitung nicht gebraucht und daher rascher geladen werden, ganz ausschaltet, wenn sie vollkommen geladen sind. Die beiden Zellenschalter sind gewöhnlich in einem Apparat mit zwei Hebeln vereinigt und heißen dann *Doppelzellenschalter*.

Fig. 413.

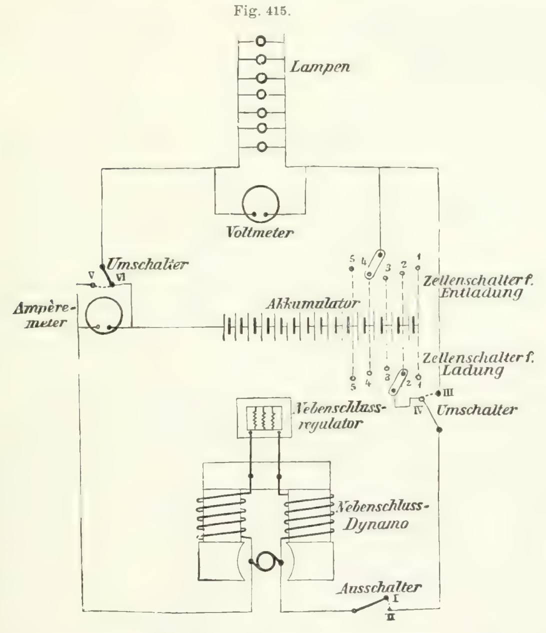
Die notwendigen Apparate zur Messung und zur Ein- und Ausschaltung des Stromes werden gewöhnlich auf einer sogenannten *Schalttafel* angebracht. Die Vorrichtungen zum Ein- und Ausschalten des Stromes oder zum Umschalten desselben von einer Leitung auf eine andere müssen natürlich für die starken Ströme, mit denen man es in der Praxis gewöhnlich zu tun hat, besonders kräftig und sorgfältig konstruiert sein. So zeigt Fig. 413 einen *Hebelausschalter* der A.E.G. im geöffneten Zustand. Auf dem an der Schalttafel zu befestigenden Brett befinden sich eng aneinander stehend zwei federnde starke Messingbacken, zwischen welche das an dem Handgriff befestigte Messingstück eingeschoben werden kann und durch Federwirkung sehr plötzlich herausgedreht werden kann. Die Leitung, welche

nach Belieben geschlossen oder geöffnet werden soll, führt unten zu der Klemme des Hebels und oben von der Klemme der Backen weiter. Um ferner einen Strom von einer Leitung auf eine andere durch eine Bewegung umzuschalten, benutzt man Umschalter, von denen Fig. 414 einen von Siemens & Halske zeigt. Ein glattes federndes Messingstück mit einem Griff kann entweder auf den rechten oder linken Kontakt, der aus einer breiten Messingfläche besteht, gedreht werden. Der Strom wird zum Hebel geführt und von diesem durch das eine oder andere Messingstück weiter in die mit diesen verbundenen Leitungen.

Fig. 414.

Die Schaltung einer Dynamomaschine, einer Akkumulatorenbatterie und einer Anzahl von Glühlampen, die sowohl von der Dynamomaschine, wie von den Akkumulatoren mit Strom versehen werden sollen, und zwar auch während der Ladung der Akkumulatoren, zeigt danach Fig. 415. Die

Fig. 415.



Akkumulatorenbatterie und die Glühlampen werden parallel geschaltet. Von der Dynamomaschine gehen rechts und links je eine Leitung aus. Zwischen diese ist die Akkumulatorenbatterie (gewöhnlich mit einem Stromrichtungszeiger, einem einfachen Galvanoskop) eingeschaltet

unter Hinzuziehung eines Doppelzellenschalters und oben in der Figur sind zwischen sie die Glühlampen alle parallel geschaltet und auch das Voltmeter liegt parallel zu ihnen. Der Umschalter rechts (bezeichnet mit III, IV) dient dazu, entweder den Akkumulatorenstrom allein direkt in die Lampen zu senden oder, wenn er so steht, wie in der Figur, den Maschinenstrom in die Akkumulatoren zu senden, diese also zu laden, und zugleich auch den Maschinenstrom in die Lampen zu senden. Das Amperemeter links kann durch einen Umschalter V, VI entweder die Stärke des Maschinenstromes oder die des Akkumulatorenstromes anzeigen. Wir wollen die einzelnen Schaltungen bei dieser Anordnung der Reihe nach betrachten.

Erster Fall. Der Ausschalter unten steht auf I. Dann ist die Dynamomaschine ganz aus dem Stromkreis ausgeschaltet und es ist nur eine Verbindung zwischen den Akkumulatoren und den Lampen vorhanden. Der Entladezellenschalter steht auf 4, mithin sind die letzten 3 Zellen ausgeschaltet und der Strom geht vom Akkumulator durch die Zelle 4 in die Lampen, von den Lampen (bei Stellung VI des Umschalters links) in den Akkumulator zurück. Stellt man den Umschalter links auf V, so geht der Strom noch durch das Amperemeter, man kann also die Stärke des Entladungsstromes messen. Das Voltmeter, das im Nebenschluß liegt, mißt die Spannung und gibt an, wie viel Zellen man durch den oberen Zellenschalter zuschalten oder abschalten muß, damit die Spannung den vorgeschriebenen Wert (etwa 110 Volt) hat.

Zweiter Fall. Der Ausschalter unten steht auf II, aber der Umschalter rechts steht auf III. Dann ist der Akkumulator ganz ausgeschaltet (falls der Kontakthebel des Entladezellenschalters auf eine Isolierung gestellt ist) und der Maschinenstrom geht direkt in die Lampen. Man kann seine Stärke messen, wenn man den Umschalter links auf VI stellt.

Dritter Fall. Der Ausschalter unten steht auf II, der Umschalter rechts auf IV. Dann geht der Maschinenstrom sowohl durch den Akkumulator wie auch durch die Lampen, und zugleich geht der Akkumulatorenstrom durch die Lampen. Und zwar ladet der Maschinenstrom alle Zellen mit Ausnahme von 1, welche abgeschaltet ist, und die Lampen werden von allen Akkumulatoren außer 1, 2, 3 gespeist. Das Amperemeter mißt den Strom, der durch den Akkumulator geht.

Die Akkumulatoren spielen eine höchst bedeutende Rolle in den elektrischen Zentralstationen, die Gleichstrom liefern. Diese müssen nämlich imstande sein, täglich den Maximalbedarf an Elektrizität für die Beleuchtung in einer Stadt zu befriedigen. Dieser Maximalbedarf findet aber im wesentlichen nur in der kurzen Zeit vom Dunkelwerden bis gegen 10 Uhr abends statt, nur in dieser Zeit werden die Maschinen voll ausgenutzt. Durch Einschalten einer Akkumulatorenbatterie kann man aber die Maschinen sehr viel kleiner wählen. Man läßt sie am Tage, wenn wenig Lichtbedarf ist, die Akkumulatoren laden und abends unterstützen dann die Akkumulatoren die Maschine zur Befriedigung des Maximalbedarfs. Gerade in Zentralstationen sind die Akkumulatoren am meisten angewendet.

Wenn elektrische Trambahnen von einer Zentrale aus betrieben werden, so erfährt der gesamte Strom, den die Dynamomaschine liefert, sehr viele und plötzliche Veränderungen seiner Stärke, da jeder Trambahnwagen

beim Angehen viel mehr Strom braucht, als bei gleichmäßiger Fahrt und andererseits wieder streckenweise vor den Haltestellen ganz ohne Strom, bloß mit der erlangten lebendigen Kraft, fahren kann. Diese stark wechselnden Belastungen haben aber auf die Antriebsmaschine die Wirkung, daß ihr Kohlenverbrauch erheblich größer wird, als wenn sie unter konstanter Belastung stehen. In diesem Falle bietet eine Akkumulatorenbatterie, die parallel zur Dynamomaschine, also auch parallel zu den Trambahnen geschaltet wird, eine vorzügliche Abhilfe. Denn die Batterie liefert, wenn sie groß genug gewählt ist, den Ausgleich für die Stromschwankungen und die Dynamomaschine hat im wesentlichen nur immer die Batterie zu laden, kontinuierlich, auch wenn diese Strom abgibt. Man nennt solche Batterieen Pufferbatterieen. Sie wirken so, als ob der wechselnde Strombedarf, bevor er die Dynamomaschine alteriert, durch die Akkumulatoren pufferweise in seinen Wechseln geschwächt und gleichmäßig gemacht wird.

Auch bei elektrischen Einzelanlagen ist gewöhnlich die Einrichtung einer Akkumulatorenbatterie deswegen von großem Vorteil, weil diese bei der Entladung, also wenn sie Strom abgibt, unbeaufsichtigt arbeiten kann. Es ist daher auch z. B. bei der Einrichtung von elektrischer Beleuchtung in Privathäusern oder Geschäften, wenn diese aus einer eigenen Dynamomaschine sich den Strom erzeugen, ratsam, eine Akkumulatorenbatterie von passender Größe einzuführen. Sonst müßte z. B. die Dynamomaschine auch in der Nacht fortlaufend im Betrieb sein, wenn man auch nur eine einzige Lampe in der Nacht anzünden will, während die Akkumulatorenbatterie ohne Bedienung Tag und Nacht betriebsbereit ist, sobald sie geladen ist.

Allgemein dient in den meisten Betrieben, in denen überhaupt Elektrizität benutzt wird, eine Akkumulatorenbatterie als ein Reservoir, welches die Elektrizität aufnimmt und zu beliebiger Zeit wieder abgibt. Die Dampfmaschinen, die in den meisten Fabriken eine vielfach wechselnde Belastung haben, arbeiten bei Vorhandensein einer Akkumulatorenbatterie gleichmäßiger und daher ökonomischer, weil sie eben bei geringerer Belastung sofort die Batterie laden und diese Arbeit dadurch zum Aufspeichern bringen können.

Eine eigenartige Anwendung haben die Akkumulatoren in den letzten Jahren in ziemlich vielen Anlagen schon gefunden, bei denen es sich darum handelt, die Kraft des Windes auszunutzen, um durch seine Hilfe elektrische Beleuchtung und elektrische Arbeitsleistung zu gewinnen. Bei der Unregelmäßigkeit des Windes ist das nur dadurch möglich, daß man durch den Wind eine Dynamomaschine treiben läßt und durch diese eine Akkumulatorenbatterie ladet, die dann die unregelmäßige Energie des Windes aufsammelt und in regelmäßigem Betriebe nutzbar abgibt. Solche Windkraftanlagen sind für einzelne Güter vielfach in Dänemark, aber auch schon in Deutschland eingerichtet worden und sogar kleine Elektrizitätswerke, die ihren Strom an Fremde abgeben, hat man auf diese Weise errichtet. Vorbedingung für sie ist natürlich, daß an dem betreffenden Orte das ganze Jahr über im allgemeinen wenigstens leichte Winde wehen. Mit gut gebauten Windmotoren (Windturbinen) kann man schon schwache Winde, die eine Geschwindigkeit von 4 m pro Sekunde haben, und bei

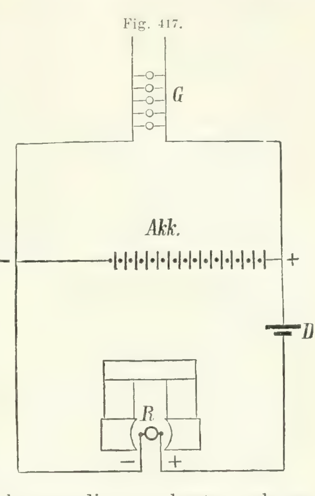
der sich zwar die Zweige von Bäumen, aber noch nicht einmal dünne Äste bewegen, zur Arbeitsleistung ausnutzen. Wird der Wind stärker, erreicht er eine Geschwindigkeit von 6 bis 7 m, bei der schon die Äste der Bäume sich bewegen, so hat ein solcher Motor gleich den drei- bis vierfachen Effekt. Bei noch stärkeren Winden ist dann die Gefahr vorhanden, daß der Windmotor beschädigt wird, wenn nicht, wie es immer der Fall ist, selbsttätige oder zu bedienende Vorrichtungen getroffen werden, daß dann die Flügelflächen sich schief zum Wind stellen, so daß ihre Geschwindigkeit in bestimmten Grenzen bleibt. Fig. 416 zeigt eine solche Windturbine auf hohem Turm, welche einen Durchmesser des Rades von 12 m besitzt und die bei 4 bis 5 m Windgeschwindigkeit 6 Pferdekräfte, bei 6 bis 7 m schon 14 und bei 8 m mehr als 20 Pferdekräfte leistet, die aber auch schon bei einem Wind von 3 bis 4 m arbeitet. Die Kraft des Rades wird durch konische Räder und eine lange Stange auf ein Vorgelege am Boden übertragen, von dem aus die Dynamomaschine getrieben wird. Die Dynamomaschine ladet eine Akkumulatorenbatterie. Von besonderer Wichtigkeit ist es nun hierbei, Vorrichtungen zu treffen, die die schädlichen Wirkungen plötzlicher oder allmählicher Änderungen in der Stärke des Windes beseitigen. Wird nämlich der Wind zu schwach, so sinkt die Spannung der Dynamomaschine und infolgedessen würde sich der geladene Akkumulator durch die Maschine entladen. Man muß also, wenn der Strom der Dynamo zu schwach wird, Sorge tragen, daß nicht der Strom des Akkumulators in umgekehrter Richtung fließt. Am einfachsten geschieht dies, indem man zwischen die Dynamo und die Akkumulatoren eine Zelle mit Aluminiumelektrode (S. 155), eine sogenannte Drosselzelle schaltet, wie Fig. 417 zeigt. Zwischen die Dynamomaschine, deren Pole mit + und — bezeichnet sind, und die Akkumulatorbatterie ist eine Drosselzelle D so geschaltet, daß ihre Aluminiumplatte mit dem + Pol des Akkumulators verbunden ist. Dann kann wohl der Strom von R zum Akkumulator, aber nicht umgekehrt vom Akkumulator nach R fließen. Statt der Aluminiumzelle wendet man auch Schaltapparate mit beweglichen Teilen an. Um umgekehrt plötzliche starke Windstöße, die den Motor und die Dynamomaschine erheblich rascher treiben und so die Spannung der Dynamo stark erhöhen würden, um diese unschädlich zu machen, braucht man auch bloß einen automatischen Schalter einzurichten, der bei rascherem Gang der Nebenschlußdynamo

Fig. 416.

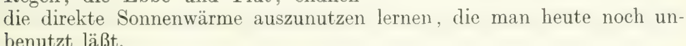


Widerstände in ihre Magnetwickelung selbsttätig einschaltet und dadurch das Magnetfeld schwächt, also die sonst durch die größere Geschwindigkeit wachsende Spannung wieder auf ihren normalen Wert bringt. Mit solchen Nebeneinrichtungen kann man eine solche Windzentrale anstandslos betreiben, wenn man nur dafür sorgt, daß man noch für alle Fälle, wenn der Wind tagelang ausbleibt, eine kleine Reserve etwa durch einen Petroleummotor oder dergl. in Betrieb setzen kann. Derartige Windkraftanlagen haben sich durch die Kostenersparnis, die sie gegen Anlagen anderer Art besitzen, an einer großen Reihe von Orten wohl bewährt.

Fig. 417.



Wenn einmal der Kohlenverbrauch so überhand genommen haben wird, daß man ernstlich daran gehen muß, der jetzigen Kohlenverschwendung zu steuern, so wird man außer im fließenden Wasser und im Wind noch andere Kraftquellen, wie den niederfallenden Regen, die Ebbe und Flut, endlich


die direkte Sonnenwärme auszunutzen lernen, die man heute noch unbenutzt läßt.

4. Kapitel.

Die Transformatoren, Umformer und Gleichrichter.

So wie die Gleichstrommaschinen in den Akkumulatoren ein äußerst wertvolles und wichtiges Hilfsmittel für ihre praktische Benutzung besitzen, so besitzen die Wechselstrommaschinen ein ebensolches, aber in anderer Richtung wirkendes, in den Transformatoren. Könnte man für Gleichströme außer den Akkumulatoren auch noch brauchbare Transformatoren, oder könnte man umgekehrt für die Wechselströme außer den Transformatoren auch noch passende Akkumulatoren erfinden, so wäre jede von diesen beiden Stromarten zu idealer Vollkommenheit zu bringen. So aber hat jede dieser beiden Stromarten ihre besonderen Vorzüge und Nachteile. Daß die Wechselströme in vielen Fällen einen wesentlichen Vorsprung vor den Gleichströmen bekommen haben, das verdanken sie den Transformatoren.

Die Transformatoren haben nämlich die Aufgabe, elektrische Ströme von hoher Spannung und geringer Intensität in solche von geringer Spannung und hoher Intensität umzuwandeln und umgekehrt.

Ein jeder elektrische Strom besitzt ja, wie wir wissen, einen gewissen Effekt, er kann in jeder Sekunde eine gewisse Arbeit leisten. Die Arbeitsmenge, welche der Strom, der in einem Leiter fließt, in jeder Sekunde abgeben kann, also der Effekt, welchen er enthält, wird gemessen durch das Produkt aus dem Spannungsunterschied seiner Enden und seiner nutzbaren Intensität (S. 256). Ist der erstere in Volt ausgedrückt, die zweite in Ampere, so ist der Effekt des Stromes in Volt-Ampere oder Watt ausgedrückt. Die Arbeit, welche der Strom in einer gewissen Zeit leisten kann, ist also das Produkt aus der Zahl seiner Watt und dieser Zeit.

Es können daher zwei Ströme ganz denselben Effekt besitzen, auch wenn sie ganz verschiedene Spannungen und ganz verschiedene Stromstärken haben, nämlich dann, wenn das Produkt aus Spannung (Volt) und Intensität (Ampere) in beiden Fällen dasselbe ist. Ein Strom, der 1000 Volt Spannung und $^1/_2$ Ampere Stärke hat, besitzt denselben Effekt wie ein anderer, der 2 Volt Spannung hat, aber 250 Ampere Stärke. Das Produkt ist beidemal 500 Watt.

Da nun der Effekt eines Stromes es ist, den man durch Aufwendung äußerer Arbeit, etwa von einer Dampfmaschine, erzeugen muß, so sieht man daraus, daß es prinzipiell möglich ist, ohne Aufwendung von besonders zu leistender Arbeit, die Spannung eines Stromes auf Kosten seiner Intensität oder die Intensität eines Stromes auf Kosten seiner Spannung zu erhöhen. Es fragt sich nur erstens, ob und wie das ausgeführt werden kann, und zweitens, ob diese Umwandlung, diese Transformation, eine praktische Verwendbarkeit besitzt.

Um die zweite Frage, die Frage nach dem Nutzen, zunächst zu beantworten, so besteht dieser hauptsächlich darin, daß die Fortleitung der Elektrizität auf größere Entfernungen bei Strömen von hoher Spannung und geringer Intensität ganz wesentlich billiger ist als bei niedrig gespannten Strömen von großer Intensität, und daß man daher durch solche Transformationen von Strömen leichter, ja oft allein imstande ist, einen der Hauptvorzüge der Elektrizität auszunutzen, nämlich ihre Fortleitungsfähigkeit auf beliebig weite Entfernungen.

Wenn ein elektrischer Strom an einer Stelle A erzeugt wird, etwa durch eine Dynamomaschine, und an einer zweiten Stelle B, die weit von der ersten entfernt sein möge, gebraucht werden soll, etwa um Bogenlampen zu speisen, so müssen A und B je durch eine Leitung, und zwar im allgemeinen durch eine doppelte Leitung — eine für den Hingang und die andere für den Rückgang des Stromes — verbunden sein. Durch diese Leitung fließt der Strom; aber dabei muß er in der ganzen Leitung selbst Wärme entwickeln, und zwar nach dem Jouleschen Gesetz. Für diese gänzlich unbrauchbare, unproduktive Wärmeentwickelung verbraucht er fortdauernd Energie, welche natürlich von der Dampfmaschine, welche die Dynamomaschine treibt, geliefert werden muß. Diese Wärmemenge, die in jeder Sekunde in der Leitung erzeugt wird, ist gleich dem Widerstand der Leitung multipliziert mit dem Quadrat der Stromstärke. Man sieht daraus: je größer bei einer bestimmten Leitung die Stromstärke ist, die man benutzt, um so größer und zwar im quadratischen Verhältnis ist die nutzlos erzeugte Wärmemenge, ist also die nutzlos aufzuwendende Arbeit. Man kann und muß nun aber verlangen, daß diese in der Leitung verlorene Energie einen bestimmten Betrag, einen bestimmten Prozentsatz der ganzen Energie nicht übersteige. Um diese Forderung zu erfüllen, hat man zwei Mittel. Das erste Mittel besteht darin, daß man den Widerstand der Leitung verringert. Da die Joulesche Wärme um so geringer ist, je geringer der Widerstand ist, so kann man — theoretisch — natürlich diese nutzlos verschwendete Energie auf jeden beliebig geringen Betrag herabdrücken, wenn man den Widerstand der Leitung verringert. Aber praktisch ist da bald eine Grenze vorhanden. Die Verringerung des Widerstandes der Leitung bei gleicher Länge kann nur dadurch geschehen, daß man den Querschnitt der Leitung vergrößert. Man muß also bei einer Kupferleitung je nach der Stromstärke dickere und dickere Kupferdrähte, Kupferstangen, nehmen, um den Verlust an Energie klein zu halten. Dadurch verteuert sich aber die Anlage ganz erheblich und es tritt bald der Punkt ein, wo man an dem für die Kupferleitung aufgewendeten Kapital ebensoviel an Zinsen verliert, als der Preis der Energie ist, welche durch geringeren Querschnitt des Kupfers verloren gehen würde. Dann hat natürlich wirtschaftlich diese Vergrößerung des Leitungsquerschnittes gar keine Bedeutung mehr. Diese Grenze tritt gewöhnlich schon bei einer Entfernung der beiden Stationen von 1000—1500 m ein.

Es bleibt ein zweites Mittel übrig, um den Energieverlust nicht über eine bestimmte Grenze gehen zu lassen, nämlich die Verringerung der Stromstärke. In der Tat, wenn man die Stromstärke kleiner machen kann, so läßt sich dadurch die Joulesche Wärme beliebig verringern.

Aber an der Ankunftsstelle braucht man ja eine bestimmte Stärke des Stromes, etwa zum Speisen von Bogenlampen, kann also, wie es scheint, mit der Stromstärke nicht beliebig heruntergehen. Hier ist nun der Punkt, an dem der Nutzen der Transformatoren eintritt. Man kann wohl die Stromstärke in der Leitung von A nach B beliebig klein machen, aber in der Ankunftsstation doch eine bedeutende Stromstärke erzeugen, wenn man den ankommenden Strom dort transformiert. Natürlicherweise kann man durch den Transformator nichts an Energie gewinnen, vielmehr muß der in B ankommende Strom mindestens so viel Effekt, so viele Watt besitzen, als man in B braucht. Da nun der ankommende Strom geringe Intensität haben soll, so heißt das, daß er große Spannung besitzen muß, denn das Produkt aus Intensität und Spannung gibt den Effekt.

Man erkennt aus diesen Betrachtungen leicht, daß man, um durch einen elektrischen Strom Energie auf weite Entfernungen übertragen zu können, ohne zu großen Verlusten ausgesetzt zu sein und ohne zu starke Leitungen anwenden zu müssen, daß man dem Strom hohe Spannung (hohe elektromotorische Kraft) und geringe Intensität geben muß. An der Verbrauchsstelle aber braucht man gewöhnlich große Intensität und verhältnismäßig geringe Spannung, und deshalb muß man einen so fortgeleiteten Strom transformieren, man muß ihn an der Verbrauchsstelle von hoher Spannung auf niedrige und von geringer Intensität auf hohe bringen.

Aber auch umgekehrt muß man manchmal an der Erzeugungsstelle einen niedrig gespannten Strom, um ihn weit fortzuleiten, zunächst auf passende hohe Spannung transformieren und am Ende der Leitung ihn dann wieder zurücktransformieren.

Diese Aufgabe nun, die Transformation der Energie eines elektrischen Stromes, ist für Wechselströme von selbst schon gelöst, wenn auch in unvollkommener Weise, in den Induktionsapparaten, wie sie seit Faraday konstruiert sind und wie wir sie auf S. 230 ff. beschrieben haben. Diese bestehen aus einer primären Drahtrolle und einer sekundären, von denen die eine, gewöhnlich die primäre, in der anderen steckt. In die Höhlung der inneren Drahtrolle wird ein Kern von weichem Eisen gebracht und zwar gebildet aus oxydierten Eisendrähten, um die Wirbelströme in ihm zu verhindern. Läßt man durch die primäre Rolle eines solchen Apparates Wechselströme hindurchgehen, die man außerhalb derselben irgendwie erzeugt, etwa durch eine Wechselstrommaschine, so erregt ja jeder Wechsel, jede Veränderung in der Intensität des primären Stromes Induktionsströme in der sekundären Rolle, und diese mit ihrer äußeren Leitung wird nun ebenfalls von Wechselströmen durchflossen. Der weiche Eisenkern verstärkt diese Induktionsströme; denn durch die Wechsel im primären Strom wird der Eisenkern selbst abwechselnd nach der einen und nach der anderen Richtung magnetisiert, und diese Veränderungen in seinem Magnetismus erzeugen ebenfalls in der sekundären Rolle die entsprechenden Induktionsstöße und verstärken die von den primären Stromschwankungen erzeugten.

Nun hängt die elektromotorische Kraft des sekundären Stromes, seine Spannung, wie wir auf S. 217 f. gesehen haben, von folgenden drei Größen ab. Zunächst von der Intensität des primären Stromes, dann

von der Zahl der Windungen auf der sekundären Rolle, und drittens von der Geschwindigkeit der primären Stromänderungen, also von der Zahl der Stromwechsel pro Sekunde. Daraus folgt, daß man es bei jedem gegebenen primären Wechselstrom in der Hand hat, einfach durch die Zahl der Windungen in der sekundären Rolle dem sekundären Strom einen beliebigen Wert der Spannung zu geben. Man kann es leicht erreichen, daß der sekundäre Strom höhere Spannung hat als der primäre. Dann muß man die Zahl der sekundären Windungen größer machen als die Zahl der primären Windungen. Man kann es auch umgekehrt leicht erreichen, daß der sekundäre Strom geringere Spannung hat als der primäre. Dann muß man der sekundären Rolle wenig, der primären Rolle viele Windungen geben. Endlich kann man auch bewirken, daß der sekundäre Strom dieselbe Spannung hat wie der primäre; dann muß man, wenn die Windungen sonst symmetrisch angeordnet sind, der primären und der sekundären Rolle die gleiche Zahl von Windungen geben.

Es kommt also wesentlich auf das Verhältnis der Zahl der primären und der sekundären Windungen an. Man bezeichnet das Verhältnis

$$\frac{\text{Zahl der primären Windungen}}{\text{Zahl der sekundären Windungen}}$$

als den Transformationskoeffizienten des Transformators.

Ist dieser Koeffizient größer als 1, so sind mehr primäre als sekundäre Windungen vorhanden, folglich wird ein Strom von höherer Spannung in einen solchen von geringerer Spannung heruntertransformiert.

Ist dieser Koeffizient kleiner als 1, so sind weniger primäre als sekundäre Windungen vorhanden, dann wird aus einem Strom von geringerer Spannung ein solcher von höherer Spannung erzeugt, die Spannung wird hinauftransformiert. Das ist der Fall bei den speziell so genannten Induktionsapparaten. Sie sind also Transformatoren mit einem Koeffizienten, der kleiner als 1 ist.

Endlich drittens, wenn dieser Koeffizient gleich 1 ist, dann haben der primäre und der sekundäre Strom gleiche Spannung. In diesem letzteren Fall findet also gar keine eigentliche Verwandlung von elektrischer Energie statt. Der primäre und der sekundäre Strom sind gleich gespannt.

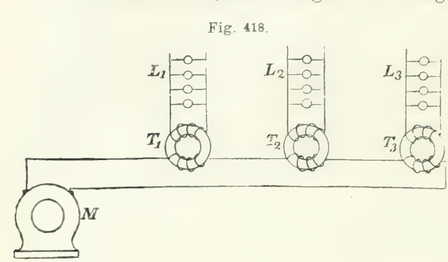
Wenn man die primäre Wickelung eines Transformators in einen Stromkreis einschaltet, so kann man seine sekundäre Wickelung benutzen, um irgendwelche elektrische Arbeiten leisten zu lassen, also Glühlampen und Bogenlampen zu betreiben, Motoren in Bewegung zu setzen u. s. w. Ist in demselben Stromkreis noch ein zweiter und dritter Transformator u. s. f. vorhanden, so sind die sekundären Stromkreise aller dieser Transformatoren voneinander unabhängig. Was in dem sekundären Stromkreise des zweiten Transformators vor sich geht, beeinflußt den sekundären Stromkreis des ersten gar nicht, falls nur der Hauptstromkreis unverändert bleibt. Man hat also in den Transformatoren ein Mittel, um aus einem primären Stromkreis eine Reihe voneinander unabhängiger sekundärer Stromkreise abzuzweigen. Jeder Transformator ist dann gewissermaßen eine eigene Dynamomaschine, die den sekundären Kreis speist.

Eine derartige Anordnung der Transformatoren wird durch Fig. 418

dargestellt. Darin bedeuten die Ringe T_1, T_2, T_3 die Transformatoren. Jeder hat unten eine Wickelung, die primäre, und oben eine, die sekundäre. Von der Maschine M gehen die zwei Leitungen aus, und in diese sind die primären Wickelungen der drei Transformatoren hintereinander geschaltet. Von der sekundären Wickelung jedes Transformators gehen dann die eigentlichen Gebrauchsleitungen L_1, L_2, L_3 aus, in welche etwa Glühlampen oder Motoren parallel eingeschaltet sind.

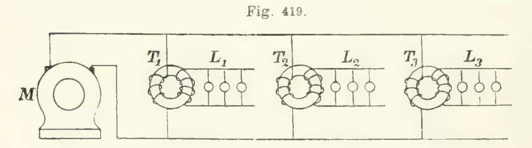
Die Absicht aber, eine billige Fortleitung des Stromes und zugleich eine Verteilung desselben auf verschiedene Verbrauchsstellen zu erzielen, wird bedeutend vorteilhafter erreicht, wenn man die Transformatoren (d. h. ihre primären Wickelungen) nicht hintereinander, sondern parallel schaltet. Das Schema für eine solche Schaltung ist in Fig. 419 gegeben, in welcher die Buchstaben dieselbe Bedeutung haben, wie in der vorigen Figur. Die primären Wickelungen der Transformatoren T_1 T_2 T_3 sind alle parallel geschaltet und in die sekundären Wickelungen sind die Stromverbrauchsapparate (Lampen etc.) ebenfalls parallel geschaltet. Die weitere Ausführung und die praktischen Vorzüge dieser Schaltung werden aber erst in dem Kap. 9 dieses Teils auseinandergesetzt werden. Hier soll nur von der Konstruktion der Transformatoren selbst, nicht von ihrer Verbindung untereinander, die Rede sein.

Fig. 418.



Eine Hauptforderung, die man an jeden Transformator stellen muß, ist die, daß er die Umwandlung der elektrischen Energie ohne große Verluste bewirkt. Mit anderen Worten, die von den Klemmen der sekundären Wickelung in den äußeren Stromkreis abzugebende elektrische Energie soll nicht viel kleiner sein, wie die in die primäre Wickelung von deren Klemmen aus hineingeleitete Energie. Ganz gleich lassen sich diese Energieen allerdings nicht machen, ein Verlust an Energie muß notwendig eintreten. Zunächst tritt sowohl in der primären wie in der sekundären Wickelung die Joulesche Wärme auf, welche auf Kosten der zugeführten Energie entsteht und welche für den Betrieb des Transformators nutzlos ist. Ferner entwickeln sich in dem Eisenkern des Transformators die Wirbelströme, welche ebenfalls Energie absorbieren. Und drittens muß ja bei den periodisch sich ändernden magnetisierenden Kräften die Koerzitivkraft des Eisens (S. 168) bald nach der einen, bald nach der anderen Richtung überwunden werden. Auch dazu ist ein Teil der primären

Fig. 419.



Energie notwendig. Diese Energieverluste durch die periodische Magnetisierung des Eisens bezeichnet man, wie oft erwähnt, als Verluste durch Hysteresis des Eisens. Man bezeichnet kurz den Verlust an Energie durch Wirbelströme und Hysteresis als Eisenverlust, den durch die Joulesche Wärme als Kupferverlust des Transformators.

Durch alle diese Verluste wird also der an den Klemmen der sekundären Wickelung zur Verfügung stehende Effekt notwendig kleiner sein als der in die primäre Wickelung eingeleitete Effekt. Man bezeichnet das Verhältnis dieser Effekte als den Wirkungsgrad des Transformators und drückt ihn in Prozenten aus.

Bei den neuen Transformatoren steigt der Wirkungsgrad bis zu 98 Proz., so daß man durch die Transformation der elektrischen Energie nur 2 Proz. derselben verliert.

Dieses vorzügliche Resultat erreichten zuerst Ganz & Co. durch eine besondere Konstruktion ihrer Transformatoren und durch möglichste Beschränkung der oben erwähnten Verluste.

Sie machten nämlich zunächst die Eisenmasse des Transformators ringförmig, sie wandten nicht, wie man es noch bei den Induktionsapparaten tut, als Eisenkern einen Stab mit zwei Polen an, sondern sie nahmen einen ganz geschlossenen Eisenkern. Diesen umgaben sie vollkommen mit den beiden Wickelungen. Ein solcher Ring hat keine freien Pole, wenn er magnetisch geworden ist, aber er wirkt genau ebenso induzierend, wenn sich sein Magnetismus ändert, wie jeder mit Polen versehene Magnet. Deswegen nennt man die Transformatoren dieser Art, in welchen also das angewendete Eisen in sich geschlossen ist, pollose Transformatoren. Die geschlossene Form des Eisenkerns hat den großen Vorzug vor der offenen Stabform, daß alle magnetischen Kraftlinien immer ganz im Eisen selbst verlaufen, daß nicht die Kraftlinien zum Teil in die Luft hinaustreten. Es findet also dabei keine Streuung (S. 168) der magnetischen Kraftlinien statt. Wenn der Magnetismus sich ändert, also die Zahl der Kraftlinien vermehrt oder vermindert wird, so geschieht das durchaus innerhalb des Eisenrings, und daher gehen alle die neu entstehenden oder die verschwindenden Kraftlinien durch die Windungen der sekundären Wickelung und erzeugen in diesen daher ohne Verluste Induktionsströme.

Zweitens aber werden solche Eisenkerne, um die Wirbelströme zu verhindern, nicht massiv hergestellt, sondern aus Eisendraht oder Eisenband, wie wir das in anderen Fällen schon mehrfach gesehen haben.

Drittens, um die Hysteresisverluste möglichst zu beschränken, ist es angemessen, die Polwechselzahl im Transformator so klein wie möglich zu machen. Das ist natürlich nur dadurch ausführbar, daß man überhaupt dem Wechselstrom, der durch die primären Transformatorwindungen geht, möglichst kleine Periodenzahlen gibt. Aus diesem Grunde gerade werden heute die Wechselstrommaschinen ziemlich allgemein nur mit 50 Perioden in der Sekunde, also mit 100 Polwechseln konstruiert.

Endlich, um die Joulesche Wärme in den Transformatoren zu verringern, muß man den Widerstand der Drahtwindungen passend klein wählen. Diese Dimensionierung hat noch, wie wir sehen werden, den weiteren Vorteil, daß die Spannung an den sekundären Klemmen sich

dabei sehr wenig ändert, ob nun der sekundäre Stromkreis geschlossen oder offen ist.

Die geschlossene, pollose Form der Transformatoren wurde nun von Ganz & Co. in doppelter Weise erzielt. Bei der ersten Art der Transformatoren wurde ein Eisenring, der aus Drähten oder Bändern oder Blechen zusammengesetzt war, zunächst mit der primären Wickelung umgeben und auf diese wurde die sekundäre Wickelung gebracht, oder es wurden besser die beiden Wickelungen getrennt in einzelnen Sektoren um den Ring gelegt. Die Transformatoren dieser Art werden Kerntransformatoren genannt, weil sie einen Eisenkern haben, auf welchen die beiden Windungssysteme gewickelt sind.

Dasselbe Ziel eines pollosen Transformators kann man aber auch dadurch erreichen, daß man die beiden Windungssysteme außen mit einem Mantel von Eisen umgibt. Auch dadurch wird das Eisen so magnetisiert, daß nirgends ein freier Pol entsteht, auch dadurch wird also ein polloser Transformator erzeugt. Damit im Eisen die Wirbelströme nicht auftreten können, wird es wieder in Form von oxydierten Drähten angewendet, die senkrecht zu den Kupferdrähten aufgewickelt werden. Diese Transformatoren der zweiten Art nennt man Manteltransformatoren. Der ringförmige Kern wird aus isolierten Kupferdrähten gebildet, die passend zur primären und sekundären Windung zusammengefaßt werden, während außen auf diesen Ringen Eisendraht gewickelt ist. Im ganzen werden jedoch jetzt hauptsächlich Kerntransformatoren, nicht Manteltransformatoren benutzt.

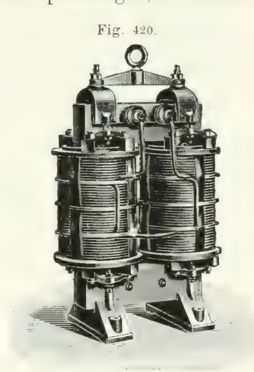
Indes erweist sich die Herstellung von Transformatoren mit einem wirklichen Eisenring als ziemlich umständlich und kostspielig, und daher werden jetzt zwar allgemein die Eisenkerne in geschlossener Form, aber nicht in Ringform ausgeführt. Man konstruiert sie häufig derart, daß zwei quadratische oder runde Eisenkerne mit den primären und sekundären Spulen abwechselnd umgeben werden, und daß diese Eisenkerne oben und unten durch Eisen miteinander verbunden und so geschlossen werden. Man unterscheidet bei jedem Transformator die Leitungen von den beiden Wickelungen als Hochspannungs- und Niederspannungsleitungen, letztere wird auch als Verbrauchsleitung bezeichnet. Häufig werden nicht bloß die beiden Enden der Niederspannungswickelung zu festen Klemmen an dem Transformator geführt, sondern es wird auch noch von der Mitte dieser Wickelung eine Leitung zu einer festen Klemme zwischen den beiden anderen geführt. Dann herrscht zwischen den beiden äußeren Klemmen die volle Spannungsdifferenz, die in der sekundären Wickelung des Transformators erzeugt wird, zwischen jeder von ihnen aber und der mittleren herrscht nur die halbe Spannungsdifferenz. Das ist häufig von Vorteil. Wenn z. B. die ganze Spannungsdifferenz der Niederspannungsleitung 100 Volt beträgt, so schaltet man Bogenlampen, welche nur die halbe Spannung von 50 Volt brauchen, zwischen die Mittelklemme und je eine von den Endklemmen.

Von allen größeren Firmen, welche mit Wechsel- oder Drehströmen arbeiten, werden jetzt Transformatoren, meistens Kerntransformatoren, hergestellt, die sich nicht im Prinzip, sondern nur in dem Aussehen und in der Art der Herstellungsweise unterscheiden und die, gutes Material

und richtige Dimensionierung vorausgesetzt, alle einen sehr hohen Wirkungsgrad ergeben. Man klassifiziert die Transformatoren, ihrer Größe nach, dadurch, daß man die Leistung, die sie abgeben können, in Kilovoltampere ausdrückt. Wir wissen ja (S. 256), daß bei Wechselströmen das Produkt aus den Volt und Ampere im allgemeinen nicht gleich der wirklichen Leistung in Watt ist, sondern daß die Watt kleiner sind als das Produkt aus den Volt und Ampere. Ein Transformator für 50 Kilovoltampere kann bei induktionsfreier Belastung, also z. B. wenn er nur Glühlampen treibt, 50 Kilowatt abgeben. Ist also die sekundäre Spannung, die er liefern soll, 100 Volt, so kann er Strom bis zu 500 Ampere abgeben. Bei induktiver Belastung ist seine Leistung geringer.

So zeigt Fig. 420 einen Transformator der Siemens-Schuckertwerke. Derselbe besitzt einen inneren Eisenkern mit darüber gelegten primären und sekundären Spulen. Die primären Spannungen, die sie aufnehmen sollen, können zwischen 5000 und 10000 Volt betragen, die sekundären Spannungen nach Belieben 115, 230 und 525 Volt. Dabei hat der kleinste Transformator für 7,5 Kilovoltampere einen Wirkungsgrad für 95 Proz., der größte von 100 Kilovoltampere einen solchen von 98 Proz. Diese Wirkungsgrade gelten für den Fall, daß der Transformator in den sekundären Stromkreis den Maximalstrom sendet, für den er konstruiert ist. Man sagt dann, der Transformator ist vollbelastet.

Fig. 420.

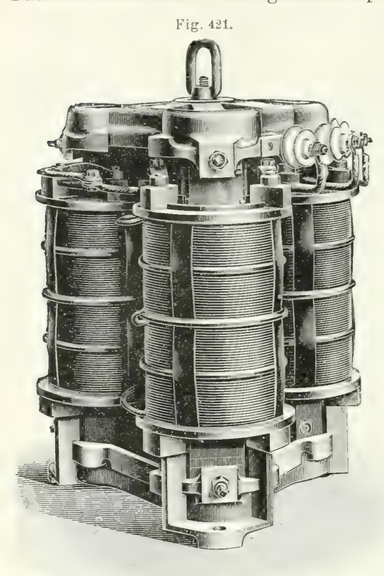


Ein Hauptaugenmerk ist bei allen Transformatoren auf vorzügliche Isolierung der Hochspannungsspulen zu richten. Da in ihnen Spannungen von vielen Tausenden Volt herrschen, so ist der kleinste Fehler in der Isolation geeignet, ein Durchschlagen von Funken herbeizuführen und dadurch den Transformator unbrauchbar zu machen. In vielen Fällen begnügt man sich deshalb nicht mit der trockenen Isolierung der Transformatorspulen durch Glimmer und andere Materialien, sondern man stellt den ganzen Transformator in Öl und bezeichnet die dafür eingerichteten Apparate als Öltransformatoren. Natürlich muß das Öl dafür besonders ausgesucht sein. Es muß ausgezeichnet isolieren, darf die Metallteile und Umspinnungen der Apparate nicht angreifen und darf nicht von selbst bei Erwärmung entflammen. Denn durch die in den Spulen auftretende Joulesche Wärme wird natürlich das Öl erhitzt. Die angewendete Menge Öl wird so normiert, daß diese Erwärmung einen bestimmten Betrag, 50 bis 60°, nicht überschreitet.

Ein besonderer Fall von Transformatoren sind die Drehstromtransformatoren. Unter Drehstrom versteht man ja ein System dreier Wechselströme, welche gegeneinander Phasenunterschiede haben. Man kann daher die drei Wechselströme transformieren, indem man jeden durch einen besonderen Transformator gehen läßt. Die transformierten

Ströme haben dann, wenn die Transformatoren gleich gebaut sind, dieselbe Phasendifferenz wie die eingeleiteten primären Ströme. Man kann diese drei Transformatoren dann auch wieder verketten. Aber man kann auch die drei Transformatoren in einem Apparat vereinigen, indem man die drei Eisenkerne oben und unten durch Eisen miteinander verbindet, so daß jeder Kern durch die beiden anderen geschlossen ist, also pollose Magnete bildet. Die Anordnung kann man dabei noch auf mehrfache Weise treffen. So sind bei den Drehstromtransformatoren der Siemens-Schuckertwerke Fig. 421 die drei Eisenkerne im Dreieck aufgestellt und oben und unten miteinander verbunden. Um jeden Eisenkern sind die primären und sekundären Spulen konzentrisch gelegt. Die drei Enden der drei Leitungen der Hochspannung und die der Niederspannung führen zu Anschlußklemmen auf entgegengesetzten Seiten des Transformators.

Fig. 421.



Bei den Drehstromtransformatoren der Allgemeinen Elektrizitäts-Gesellschaft, die alle mit Ölisolation versehen sind, sind die drei Eisenkerne in eine Ebene gestellt, wie man aus Fig. 422 sieht, und ebenso konzentrisch mit den beiden Wickelungen umgeben. Sie werden für Primärspannungen bis 10000 Volt konstruiert. Der ganze Transformator befindet sich in einem Ölkasten, der entweder glatt, wie Fig. 423, oder gewellt ist. Auch bei diesem Transformator gehen die Wirkungsgrade bis zu 98 Proz.

Fig. 422.

Fig. 423.

Bei allen Transformatoren wird der Widerstand in der sekundären Spule (Niederspannung) immer so klein gemacht, daß die Joulesche Wärme nur etwa 1 Proz. der gesamten Energie bei Vollbelastung (Maximalstrom) beträgt. Damit ist nun zugleich der Vorteil verbunden, daß der Spannungsverlust in einer solchen Spule selbst beim maximalen Strom

sehr gering ist. Daher ist die Klemmenspannung dieser Spule immer nahezu gleich der elektromotorischen Kraft des sekundären Stromes. So ist z. B. bei den besseren Transformatoren der verschiedenen Firmen der Unterschied in der Klemmenspannung der sekundären Klemmen, wenn diese einmal vollkommen unverbunden, das andere Mal durch einen so kleinen Widerstand geschlossen sind, daß der Maximalstrom fließt, nur 2 bis 3 Proz. der ganzen Spannung. Daher bleibt bei allen äußeren Widerständen, d. h. bei jeder Arbeit, die der Transformator leistet, die sekundäre Klemmenspannung dieselbe, so lange die primäre Klemmenspannung und die Stromwechselzahl unverändert gelassen werden. Daraus folgt, daß ein solcher gut gebauter Transformator immer konstante Klemmenspannung an den sekundären Klemmen hat, wenn nur die primäre Klemmenspannung dauernd gleich erhalten wird. Das ist aber ganz besonders wichtig, weil, wie wir sehen werden, die Verteilung der Energie in rationeller Weise nur dadurch ausgeführt werden kann, daß die Klemmenspannung an dem stromliefernden Apparat (hier den sekundären Klemmen des Transformators) dieselbe bleibt, wie groß oder klein auch der äußere Widerstand sei. Daher eignen sich die Transformatoren ausgezeichnet zur Verteilung der Energie.

Durch die Transformatoren hat man es also bei Wechselströmen in der Hand, die beiden Faktoren, von denen der Effekt eines Stromes abhängt, nämlich Spannung und Stromstärke, beliebig zu ändern, die eine auf Kosten der anderen zunehmen, oder zu Nutzen der anderen abnehmen zu lassen. Und dabei haben die Wechselstromtransformatoren die großen Vorzüge, daß sie einen sehr hohen Nutzeffekt besitzen und daß sie keine Bedienung gebrauchen. Sie enthalten eben keine beweglichen Teile, sondern nur feste Drahtwindungen. Daher kann man durch solche Apparate leicht Wechselströme von hoher Spannung in solche von geringer transformieren und daher auch alle die Vorteile ausnutzen, welche die hohe Spannung eines Stromes bei geringer Stärke für die ökonomische Fortleitung bietet.

Für Gleichströme ist eine solche Transformation durch feste Apparate, ohne bewegliche Teile, und namentlich eine Transformation für sehr hohe Spannungen nicht ausführbar.

Dagegen sind für Gleichströme Transformatoren zu anderen Zwecken gebaut worden. Es kommt zuweilen vor, daß in einer elektrischen Anlage, welche mit Gleichströmen von etwa 110 Volt Spannung betrieben wird (wie in den meisten Zentralen), daß in dieser für einige Zwecke höhere Spannungen gebraucht werden. Wenn z. B. eine Akkumulatorenbatterie von 100 Zellen von diesem Leitungsnetz geladen werden soll und man nicht die Zellen in mehrere Abteilungen teilen will, so braucht man dazu eine Spannung von etwa 250 Volt. Oder wenn eine Trambahn elektrisch von diesem Netz betrieben werden soll, so braucht man für diese gewöhnlich höhere Spannungen, 300 bis 500 Volt. Es handelt sich also hier häufig darum, Gleichströme von niedriger Spannung (110 Volt) auf höhere Spannung (250 oder 500 Volt) zu transformieren, wenn auch nicht darum, sie auf sehr hohe Spannung, Tausende von Volt, zu bringen. Man kann diese Aufgabe in folgender Weise lösen. Es werden zwei Gleichstrommaschinen zusammengekoppelt, indem sie entweder eine gemeinschaftliche Achse

besitzen oder durch Riemen miteinander verbunden werden. Die eine dieser Maschinen dient als Elektromotor, d. h. sie wird durch einen hineingeführten (den zu transformierenden) Strom getrieben. Dadurch dreht sie zugleich die zweite Maschine und von deren Bürsten lassen sich dann Ströme abnehmen. Der Anker der zweiten Maschine ist nun so gewickelt, daß er bei derselben Tourenzahl eine größere oder geringere elektromotorische Kraft liefert als der erste. Folglich erhält man vermittels des in die erste Maschine eintretenden Stromes von der zweiten Maschine einen Strom von anderer Spannung, man hat die eingeführte Energie transformiert. Wenn die beiden Dynamomaschinen Nebenschlußmaschinen sind, so kann man sehr leicht die Spannung des Stromes, den man aus dem gegebenen transformiert erhalten will, in weiten Grenzen ändern. Indem man nämlich in den Nebenschluß der zweiten Maschine, die als Dynamo wirkt, Widerstände ein- und ausschaltet, kann man deren Spannung, wie bekannt, ändern. Aber indem man auch bei der ersten Maschine, die als Motor wirkt, dasselbe tut, Widerstände aus ihrer Magnetwickelung aus- oder in sie einschaltet, kann man, wie wir bei der Behandlung der elektrischen Motoren sehen werden, ihre Geschwindigkeit verändern. Dadurch ändert sich aber auch die Geschwindigkeit der zweiten Maschine, der Dynamo, in derselben Weise, und man hat dadurch ein zweites, mit dem ersten zusammenwirkendes Mittel, um die Spannung des erzeugten Gleichstromes in weiten Grenzen zu regulieren.

Da man aber, wie oft erwähnt, Gleichstromdynamos nicht für sehr hohe Spannungen bauen kann, so ist der Bereich, in welchem eine Transformation bei Gleichströmen überhaupt möglich ist, ein ungleich geringerer als bei Wechselströmen. Während es bei den letzteren ganz einfach ist, einen Strom von 5000 oder 10 000 Volt Spannung in einen solchen von 100 Volt zu transformieren oder umgekehrt, kann man bei Gleichströmen im allgemeinen schon zufrieden sein, wenn man von 100 Volt auf 500 Volt oder umgekehrt umformen kann. Außerdem brauchen natürlich die beiden Maschinen, wie alle Apparate mit bewegten Teilen, dauernde Aufsicht, während diese bei den eigentlichen Wechselstromtransformatoren nicht nötig ist.

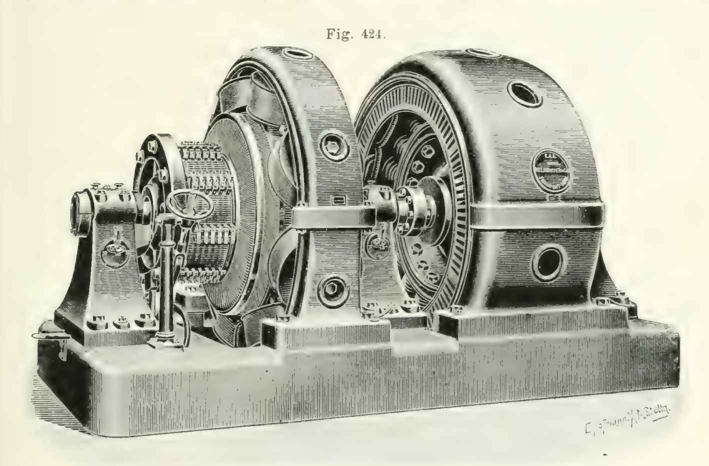
Dasselbe Prinzip der zusammengekoppelten Maschinen ist auch anwendbar, um Gleichströme in Wechselströme zu verwandeln und umgekehrt. Man muß nur zu dem Zweck auf eine und dieselbe Achse eine Wechselstrommaschine und einen Gleichstrommotor, oder eine Gleichstrommaschine und einen Wechselstrommotor setzen. In den Motor leitet man im ersten Falle Gleichstrom ein und erhält von der Dynamomaschine Wechselstrom zurück. Im zweiten Fall leitet man in den Motor Wechselstrom ein und erhält von den Bürsten der Dynamo Gleichstrom zurück. Wenn man z. B. in einem Leitungsnetz, das von Wechselströmen betrieben wird, einen Akkumulator laden will, so muß man einen solchen Wechselstrom-Gleichstromumformer einführen.

Es ist von selbst ersichtlich, daß man auf dieselbe Weise auch Gleichstrom in Drehstrom umformen kann und umgekehrt, indem man eine Gleichstrom- und eine Drehstrommaschine auf dieselbe Achse setzt. In

Fig. 424 ist ein derartiger Motor-Generator dargestellt. Er zeigt auf gemeinschaftlicher Grundplatte rechts die Drehstromdynamo, links den Gleichstrommotor, deren Achsen miteinander gekuppelt sind. Oft macht man auch für beide Maschinen eine einzige durchgehende Welle, welche sowohl die Ankerwicklung des Wechselstroms wie die des Gleichstroms trägt.

Man kann auch diese Umformung mit einer einzigen Maschine bewirken, einer gewöhnlichen Gleichstrommaschine, bei der bloß die Ankerspulen noch zu Schleifringen auf deren Achse geführt werden, so daß

Fig. 424.



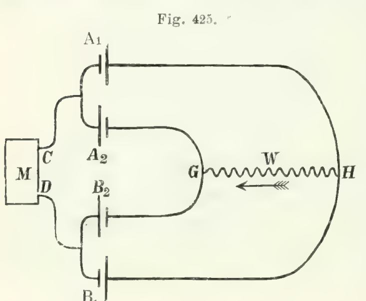
man aus ihnen (Wechselstrom oder) Drehstrom entnehmen kann, wenn man sie mit Gleichstrom betreibt, oder umgekehrt. Doch wollen wir diese rotierenden Umformer nicht ausführlicher besprechen.

Die Umformer, welche aus Wechselstrom oder Drehstrom Gleichstrom erzeugen, haben eine erhebliche und wichtige Anwendbarkeit. Wie nämlich schon mehrfach erwähnt wurde, macht die Anwendung der Wechselströme und insbesondere der Drehströme in den großen elektrischen Anlagen immer weitere Fortschritte, weil diese sich als bedeutend ökonomischer in Hinsicht der Fortleitung und Verteilung erweisen. Für manche Zwecke aber sind Wechselströme durchaus unbrauchbar, nämlich für alle elektrochemischen Betriebe und für alle Anlagen, in welchen Akkumulatoren zu laden sind. Diese können nur mit Gleichstrom betrieben werden, und gerade aus diesem Grunde werden zuweilen in städtischen Anlagen zwar Drehströme von hoher Spannung erzeugt und fortgeleitet, aber in den einzelnen Bezirken, in denen sie gebraucht werden, werden sie durch Umformer in Gleichstrom verwandelt.

Übrigens ist es noch auf eine andere, gänzlich abweichende Art und Weise möglich, Wechselströme und Drehströme in Gleichströme zu ver-

wandeln und dies ganz ohne rotierende Apparate. Und zwar sind es die elektrolytischen Vorgänge an einer Aluminiumanode, welche dieses ermöglichen. Es wurde auf S. 155 angeführt, daß eine gewöhnliche Zersetzungszelle, bei welcher die eine Elektrode aus Aluminium, die andere aus einem beliebigen indifferenten Stoff, etwa Eisen oder Kohle, besteht, daß eine solche Zelle besondere Eigenschaften besitzt. Wird nämlich ein Strom durch sie in solcher Richtung hindurchgesendet, daß sich Sauerstoff an der Aluminiumelektrode abscheidet, so bringt dieser eine so schlecht leitende Schicht an dieser Elektrode hervor, daß nur minimale Ströme durchgelassen werden, während, wenn der Strom in umgekehrter Richtung hindurchgeht, er kein besonderes Hindernis findet. Wendet man als Flüssigkeit eine Lösung von doppeltkohlensaurem Natron oder von borsaurem Ammoniak an, so werden Ströme bis zu 100 und mehr Volt Spannung in derjenigen Richtung, in welcher die Aluminiumelektrode mit dem positiven Pol verbunden ist, außerordentlich geschwächt, so daß nur ganz schwache Ströme in dieser Richtung hindurchgehen. Man kann daher solche Graetzsche Zellen oder Drosselzellen auch zur Gleichrichtung eines Wechselstromes benutzen. Schickt man nämlich einen Wechselstrom z. B. von 110 Volt Spannung durch eine solche Zelle hindurch, so werden offenbar diejenigen Teile des Wechselstromes, für welche das Aluminium Anode ist, nicht hindurch gelassen, während die anderen Hälften hindurchgehen. Man bekommt also in der Leitung unterbrochenen Gleichstrom. Aber man verliert dabei zunächst die Hälfte des ganzen Stromes. Indes kann man durch eine besondere Schaltung, welche man die Graetzsche Schaltung nennt, es auch bewirken, daß man den ganzen Wechselstrom in (pulsierenden) Gleichstrom verwandelt.

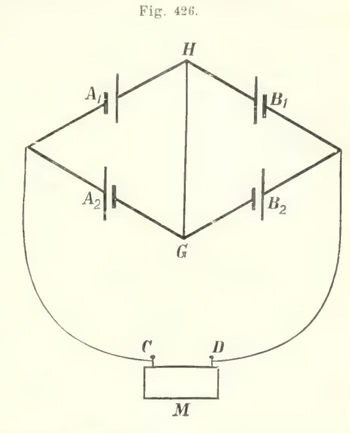
Fig. 425.



Diese Schaltung ist in Fig. 425 angegeben. Es bedeutet darin M eine Wechselstrommaschine und A_1, A_2, B_1, B_2 stellen 4 solche Drosselzellen dar, bei denen die langen Striche immer die Aluminiumelektrode, die kurzen die andere Elektrode (gewöhnlich Eisen) bedeuten. Mit jedem der beiden Pole C und D der Maschine verbindet man zwei solche Zellen parallel und zwar die eine mit der Aluminiumelektrode, die andere mit der Eisenelektrode. Die freien Aluminiumelektroden von A_1 und B_1 werden dann durch einen Draht $A_1 H B_1$, die freien Eisenelektroden durch einen Draht $A_2 G B_2$ verbunden und zwischen diese beiden Leiter werden dann die Apparate W eingeschaltet, in denen Gleichstrom fließen soll. Ist nämlich in einem Moment z. B. der Pol C positiv, so kann der Strom von ihm nur über $C A_1$ bis H, dann durch W in der Richtung des Pfeiles nach G fließen (da ihm der Weg durch B_1 versperrt ist, weil dort die Aluminiumelektrode Anode würde) und von G über B_2 zum negativen Pol D. Ist in der nächsten halben Periode des Wechselstromes C negativ, also D positiv, so fließt der Strom

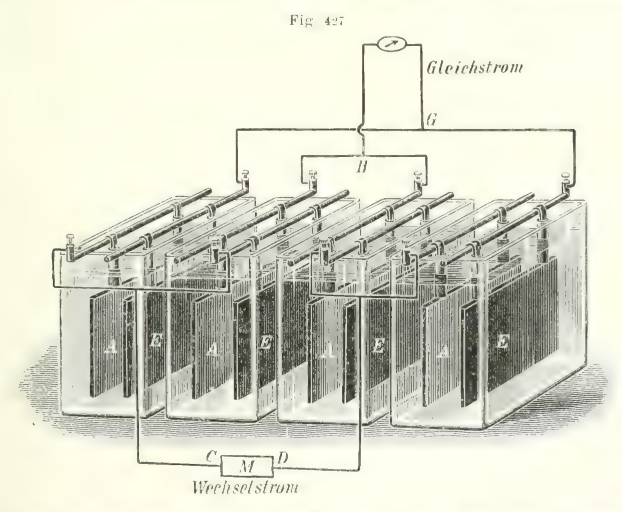
von D über B_1 (in B_2 wäre Aluminium Anode) nach H, dann auch wieder in der Richtung des Pfeiles nach G (denn der Weg über A_1 ist versperrt) und von G über A_2 nach dem negativen Pol C. Beide Hälften des Wechselstromes sind also in dem Leiter H G gleichgerichtet. Man bezeichnet deswegen eine solche Kombination von 4 Zellen in dieser Schaltung auch als Gleichrichter. Übersichtlicher ist die Schaltung in Fig. 426 gezeichnet, in der die gleichen Buchstaben verwendet sind. Aus dieser ersieht man, daß die 4 Zellen in die 4 Zweige einer Wheatstoneschen Brücke eingeschaltet sind. In der Brücke H G fließt dann Gleichstrom, wenn M eine Wechselstromquelle ist.

Fig. 426.



Obwohl dieses Verfahren für die Anwendung im großen noch nicht durchgebildet ist, ist es sehr bequem und ohne große Kosten da zu benutzen, wo es sich nur darum handelt, für kleine Apparate, also für verhältnismäßig geringe Stromstärken aus einer Wechselstromanlage

Fig. 427.



Gleichstrom zu entnehmen. Die Formen, die man den Elektroden gibt, sind unwesentlich, nur hat es sich als vorteilhaft erwiesen, dafür

zu sorgen, daß die Aluminiumelektrode immer von der Flüssigkeit bedeckt ist. Da sich die Flüssigkeit beim Betrieb der Gleichrichter stark erwärmt, ist es vorteilhaft, große Gefäße anzuwenden. Eine einfache Form dieser Zellen (von der Polyphos, E. G., München) zeigt Fig. 427. Die Elektroden bestehen dabei aus Eisen E und Aluminium A, die Flüssigkeit ist doppeltkohlensaures Natron. Die Platten sind an Metallstäben befestigt, die auf den Gläsern liegen. Die aus der Flüssigkeit herausragenden Teile sind mit Glasröhren umgeben. Die Verbindung mit der Wechselstromquelle vorn und für die Gleichstromseite hinten ist genau wie in Fig. 424. Von manchen Fabriken sind solche Apparate bisher bis zu 4 Kilowatt Leistung mit 75 Proz. Nutzeffekt gebaut worden.

Dieser elektrolytische Gleichrichter hat prinzipiell den großen Vorzug vor den rotierenden Umformern, daß er keine Bedienung verlangt. Er arbeitet selbsttätig, hat keine beweglichen Teile, braucht keine Schmierung und Wartung. Aber für große Leistungen ist er, wie gesagt, noch nicht in befriedigender Weise technisch durchgearbeitet.

Ähnliche Vorzüge besitzt ein auf scheinbar ganz anderem, aber doch ähnlichem Prinzip basierender Gleichrichter, nämlich der Quecksilberdampfgleichrichter. Dieser beruht auf einer Eigenschaft des Quecksilberbogenlichts im Vakuum. Während nämlich ein Lichtbogen zwischen Kohlen auch mit Wechselstrom betrieben werden kann, ist das bei einem Lichtbogen, der Metallelektroden besitzt, nicht der Fall und zwar wegen der größeren Wärmeleitungsfähigkeit derselben. Zum Bestehen des Lichtbogens ist nämlich notwendig, daß die Kathode desselben eine sehr hohe Temperatur (Weißglut) besitzt, weil aus solchen glühenden Körpern die negativen Elektronen leicht austreten können. Die Weißglut wird beim Zünden eines Lichtbogens dadurch hervorgebracht, daß positive Elektronen auf die Kathode stürzen und sie erhitzen. Wird aber der Lichtbogen mit Wechselstrom betrieben, so erkaltet die Kathode, während der Strom die entgegengesetzte Richtung hat und zwar ist diese Erkaltung bei einer Metallelektrode groß genug, daß der Strom dann nicht mehr ohne neue Zündung einsetzen kann, während bei den weniger gut leitenden Kohleelektroden die Erkaltung in der Zwischenzeit nicht so intensiv ist, daß der Lichtbogen sich nicht von selbst wieder entzünden könnte. Dies wird nun beim Quecksilberlichtbogen in sehr sinnreicher Weise zur Gleichrichtung von Wechselströmen ausgenutzt.

Fig. 428.

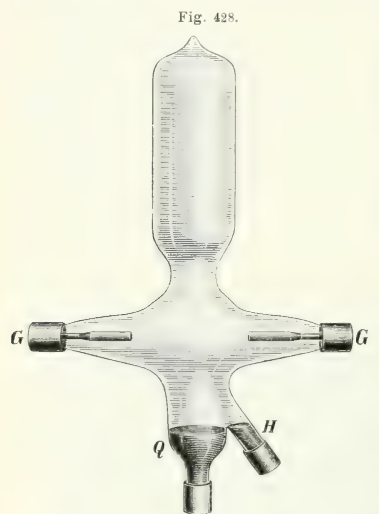
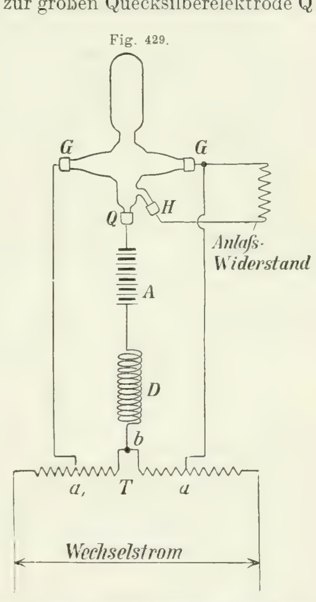


Fig. 428 zeigt einen solchen Gleichrichterkolben von der Westinghouse-El.Akt.Ges. in Berlin. Er ist eine luftleere Glasbirne, welche an der Seite rechts und links je eine Graphitelektrode G, G besitzt, während unten eine große Quecksilberelektrode Q zu sehen ist und daneben noch eine kleine Quecksilberelektrode H, die nur zur ersten Zündung der Dampflampe dient. Um einen Wechselstrom gleichzurichten und durch ihn etwa eine Akkumulatorenbatterie zu laden, wird eine Schaltung benutzt, die aus Fig. 429 zu ersehen ist. Der Wechselstrom geht durch einen Transformator, der aber nicht notwendig die Spannung zu erhöhen braucht, sondern nur der Schaltung wegen angebracht ist und wird von dessen Enden a und a_1 zu den beiden Graphitelektroden geführt. Von der Mitte des Transformators aus führt die Leitung über eine Induktionsspule D (Drosselspule) zur großen Quecksilberelektrode Q des Gleichrichters und in diese Leitung werden die Akkumulatoren A so eingeschaltet, daß an Q der positive Pol gelegt ist. Durch einen Anlaßwiderstand wird bei der ersten Einschaltung H mit G verbunden und durch Kippen des Gefäßes der Lichtbogen zwischen H und Q erzeugt. Ist so einmal Q auf die hohe Temperatur gebracht worden, so behält es diese nun dauernd bei, da immer abwechselnd die eine der beiden Graphitelektroden G G positiv wird und den Strom durch die Lampe sendet. Damit die Quecksilberelektrode sich nicht abkühlt, während die Spannung des Wechselstroms durch Null hindurchgeht, ist als wesentliches Hilfsmittel die Drosselspule D eingeschaltet. Diese erzeugt, wie wir wissen (S. 263), eine Verzögerung des Stromes gegenüber der Spannung. Es bleibt also der Strom von der einen Elektrode G zur Quecksilberkathode noch auf einer passenden Stärke, während schon die andere Elektrode G positiv geworden ist und ihrerseits den Strom nach dem Quecksilber sendet. Dadurch erlischt der Lichtbogen nicht. In der umgekehrten Richtung, von Q nach G G kann der Strom nicht fließen, da die Lampe den gutleitenden Quecksilberdampf zu ihrem Funktionieren braucht und dieser nur dadurch, trotz der Abkühlung an den Wänden, bestehen bleibt, daß eben die Quecksilberkathode heiß genug ist und immer wieder Dampf aussendet.

Fig. 429.



Diese Quecksilberdampfgleichrichter lassen sich bisher für Stromstärken bis zu 30 Ampere herstellen, erfordern ebenfalls beim Gleichrichten keine Bedienung und sind zwar nicht billig, aber recht haltbar.

Wenn man solche Gleichrichter für viel höhere Stromstärken konstruieren will, so kann man Glasgefäße nicht anwenden, weil diese die hohe Temperatur dann nicht mehr vertragen. Man muß Metallgefäße benutzen, und es werden bereits Versuche gemacht, um auf diese Weise Gleichrichter für sehr hohe Leistungen zu konstruieren.

Durch die letztbesprochenen Mittel versucht man einen leichten Übergang vom Wechselstrom zum Gleichstrom zu gewinnen. Im allgemeinen aber hat sich allmählich eine Scheidung der Kompetenzen zwischen Wechselstrom (resp. Drehstrom) und Gleichstrom in der Art ausgebildet, daß für weite Entfernungen der Stromverbrauchsplätze untereinander und von der Maschine der Drehstrom mit Transformatoren eintritt, während für enge, kleine Betriebe der Gleichstrom das Übergewicht hat. In der Tat sind jetzt eine große Reihe von elektrischen Anlagen mit hochgespannten Drehströmen und Transformatoren bereits ausgeführt an Orten, wo ohne eine ökonomische Fernleitung hochgespannter Ströme eine zweckmäßige elektrische Einrichtung nicht möglich gewesen wäre. Die Umformung dieser Wechselströme und Drehströme in Gleichströme, wie sie oben besprochen wurde, gibt diesen Anlagen für manche Anwendungen noch diejenigen Vorteile, welche der Wechselstrom sonst entbehrt.

---

5. Kapitel.

Das elektrische Bogenlicht.

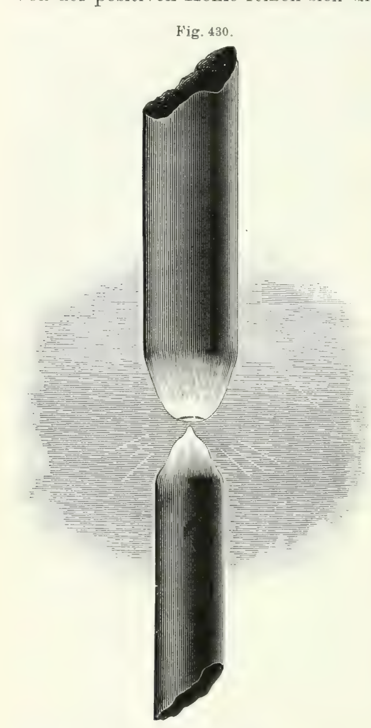
Eine hellere und glänzendere Lichtquelle als das Licht des elektrischen Flammenbogens auf künstlichem Wege herzustellen, ist der Menschheit noch nicht gelungen. Kein künstliches Licht, sondern nur das Licht der Sonne übertrifft an Stärke dasjenige, welches wir mittels des elektrischen Stromes durch den Lichtbogen erzeugen können. Um aber den elektrischen Lichtbogen zu einer wirklich brauchbaren Beleuchtung geeignet zu machen, dazu war ein großer Aufwand von erfinderischem Geist und technischem Können notwendig. Wer vor etwa 30 Jahren die ersten Versuche zur Aufstellung elektrischer Lampen gesehen hat, erinnert sich, daß zwar die glänzende Helligkeit des Lichtes auffiel, daß dieses Licht aber derartig flackernd, springend, unzuverlässig war, daß man an eine wirkliche dauernde Verwendung desselben nicht glauben konnte.

Das elektrische Licht entsteht, wie auf S. 116 ff. auseinandergesetzt ist, wenn ein starker elektrischer Strom zwischen zwei Kohlenspitzen übergeht, die durch eine kleine Strecke erhitzter Luft voneinander getrennt sind. In dem ziemlich großen Widerstand, welchen der Strom in einer solchen Luftstrecke und bei dem Übergang aus den Kohlen in die Luft findet, wird nach dem Jouleschen Gesetz eine große Wärmemenge erzeugt und diese bleibt, da die Luftstrecke zwischen den Kohlen nur klein ist, konzentriert an dieser Stelle und erhitzt sowohl die Luft wie die Enden der Kohlen selbst.

Die Erfahrung lehrt nun, daß bei einem mit Gleichströmen betriebenen Lichtbogen zwischen den Kohlen eine Spannung von ca. 40 Volt herrschen muß, damit der Lichtbogen entstehe, bei einem mit Wechselströmen betriebenen dagegen eine viel kleinere, etwa 28 Volt. Daß eine so große Spannung dazu gehört, um überhaupt einen Lichtbogen zu betreiben, hat nicht etwa in dem Widerstand der Luft allein seinen Grund. Der Widerstand der warmen Luftschicht ist nicht so bedeutend, um einen so großen Spannungsverlust hervorzubringen. Vielmehr wird bei dem Übergang des Stromes aus den Kohlen in die Luft ein hoher Übergangswiderstand erzeugt. Die Enden der Kohlen und die zwischen ihnen liegende Luftschicht werden heiß und glühen, und zwar glühen die Kohlenenden hellweiß, während die Luft violett leuchtet. Die hohe Temperatur der Kohlen, welche zwischen 2500 und 3500° C. liegt, macht die Luft selbst glühend. Die glühenden Kohlenenden scheinen direkt in Dampfform überzugehen, zum Teil reißen sich auch fortwährend von ihnen Teilchen ab und fliegen glühend durch die Luftschicht hindurch zu der gegenüberliegenden Elektrode. Dies ist das allgemeine Bild des elektrischen Bogenlichts oder des Flammenbogens. Das eigentlich Leuchtende im elektrischen Licht ist nicht der Flammenbogen, welcher als glühendes Gas nur wenig

Licht aussendet. Das eigentlich Leuchtende sind vielmehr die weißglühenden Enden der Kohlenelektroden selbst. Von beiden Elektroden aus fliegen glühende Kohlenteilchen fort, sowohl durch die Luftschicht hindurch zu der anderen Elektrode, als seitlich in den freien Raum. Aber diese Zerstäubung der Elektroden ist nicht bei beiden die gleiche. Von der positiven Kohle reißen sich die Teilchen in weit größerer Zahl ab als von der negativen, und so kommt es, daß wenn das Bogenlicht eine Zeitlang besteht und wenn Gleichströme angewendet werden, daß dann die positive Kohlenelektrode sehr bald sich aushöhlt und einen weißglühenden Krater bildet. Zugleich hat die positive Kohle eine viel höhere Temperatur als die negative, 3500 gegen 2500°. Die negative Kohle bleibt während des Vorganges immer erhaben und spitzt sich zu. Man sieht das Bild der beiden Kohlen in Fig. 430. Auf den Kohlenenden sieht man fortwährend eine Menge von runden Partikelchen hin und her laufen und sich warzenförmig an beliebige Stellen ansetzen. Es rühren diese von Verunreinigungen der Kohle her, welche durch die große Glut schmelzen. Die Kohlen für elektrisches Licht werden besonders fabrikmäßig hergestellt und zwar verwendet man entweder nur aus Kohlenpulver unter einem Druck von 200 bis 400 Atmosphären gepreßte Kohlenstäbe (sogenannte Homogenkohlen) oder aber man macht die Kohlenstäbe hohl und versieht sie mit einem Kern aus Kohle, die mit einer leicht flüchtigen Substanz, gewöhnlich Wasserglas, gemischt mit fein verteiltem Ruß, imprägniert ist (sogenannte Dochtkohlen). Fig. 430 zeigt oben als positive Kohle eine Dochtkohle, unten als negative eine Homogenkohle. Das Dochten der Kohlen hat den Zweck, durch die bessere Leitung des Dochtes zu bewirken, daß der Lichtbogen immer von der Mitte der Kohle ausgeht und nicht längs der Kohle herumwandert.

Fig. 430.



Die Kohlen brennen in der Glühhitze durch das Hinzutreten des Sauerstoffs der Luft allmählich ab, und zwar, wie erwähnt, bei Gleichströmen die positive Kohle rascher als die negative. Deswegen nimmt man bei den elektrischen Lampen für Gleichstrom die positive (obere)

Kohle gewöhnlich doppelt so dick als die untere (wie auch Fig. 430 zeigt), damit beide Kohlenstäbe nahezu gleich lange brennen können.

Man kann aber ebensogut elektrisches Licht auch durch schnell wechselnde Wechselströme erzeugen. Denn die Erwärmung der Elektroden hängt ja nach dem Jouleschen Gesetz ab von dem Quadrat der Stromstärke. Ob also der positive Strom in der einen Richtung oder in der anderen Richtung durch die Kohlen fließt, die Erwärmung bleibt immer dieselbe, wenn die äußeren Verhältnisse dieselben bleiben. Von der Erwärmung hängt aber direkt die Lichtmenge ab, welche die Kohlen ausstrahlen können, und daher sind Wechselströme ebenso geeignet zur Erzeugung des elektrischen Bogenlichtes wie Gleichströme, wenn nur die Wechselströme rasch aufeinander folgen. Bei den Wechselstrommaschinen, wie sie jetzt konstruiert werden, finden in jeder Sekunde etwa 100 Stromwechsel statt, eine Zahl, welche vollkommen ausreicht, um den Lichtbogen zu erhalten und das durch die Ströme erzeugte Licht als ganz kontinuierlich erscheinen zu lassen.

In einer anderen Beziehung dagegen findet ein Unterschied im elektrischen Licht statt, je nachdem es von Wechselströmen oder von gleichgerichteten Strömen erzeugt wird. Wenn durch die Kohlen ein stets gleichgerichteter Strom fließt, so bildet sich an der positiven Elektrode, wie gesagt, eine leuchtende Vertiefung, ein leuchtender Krater. Macht man daher die obere Kohle zur positiven Elektrode, so bildet sie gewissermaßen einen Reflektor, durch welchen die Lichtstrahlen nach unten geworfen werden. Das Licht breitet sich nicht gleichmäßig nach allen Seiten aus, sondern es wird mehr Licht nach unten geworfen, als nach den Seiten geht. Und da man gewöhnlich unten das Licht braucht, so ist das sehr vorteilhaft. Bei Anwendung von Wechselströmen dagegen wird abwechselnd jede Kohle bald positive, bald negative Elektrode. Infolgedessen brennen beide Kohlen gleich rasch ab; es bildet sich kein Krater in ihnen, sondern sie bleiben beide zugespitzt, wie sie es von vornherein waren. Um daher in diesem Falle die Hauptmenge des Lichts nach unten zu werfen, muß man künstlich Reflektoren anwenden, was man bei Gleichströmen nicht nötig hat.

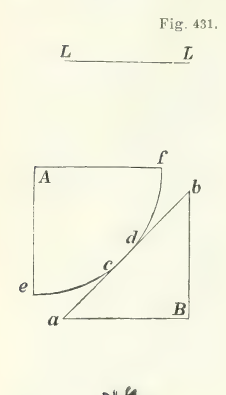
Läßt man elektrisches Licht frei, d. h. ohne Glocke brennen, so ist die Lichtstärke, welche man durch ein Photometer messen kann, bei Gleichströmen ganz erheblich verschieden, je nach der Richtung, in welcher das Licht auf das Auge oder das Photometer fällt. Es ist z. B. bei einer Lampe, die durch Gleichströme gespeist wird, die Stärke des Lichtes, wenn es in horizontaler Richtung beobachtet wird, nur etwa der fünfte Teil von der, welche es zeigt, wenn unter 60° gegen die Horizontale beobachtet wird. Man muß deshalb elektrisches Licht, welches von Gleichströmen erregt wird, stets so hoch anbringen, daß die Strahlen unter bestimmtem Winkel auf die zu beleuchtende Fläche fallen. Bei Anwendung von Glocken werden die Unterschiede der Helligkeit in verschiedenen Richtungen vermindert.

Um ein Urteil über die Stärke des elektrischen Lichtes zu haben, muß man dasselbe mit anderen leuchtenden Körpern vergleichen. Diese Vergleichung vorzunehmen, ist die Aufgabe der Photometrie.

Es wird jetzt zur genauen Vergleichung von Lichtstärken gewöhnlich

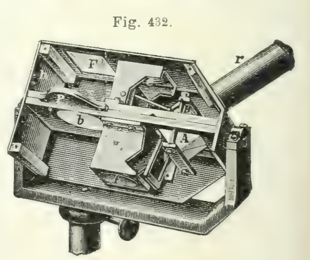
das Lummer-Brodhunsche Photometer benutzt. Dieses besteht, wie die schematische Fig. 431 zeigt, aus zwei rechtwinkligen Glasprismen A und B, die in einem Flächenstück c d dicht aufeinandergepreßt sind. Wenn dieses System von einer Lichtquelle L L beleuchtet wird, so gehen die Strahlen durch c d ohne weiteres hindurch und treffen in ein bei O befindliches Auge, während die Strahlen, die auf f d und c e fallen, dort reflektiert werden, also nicht nach O gelangen. Das Auge sieht also einen hellen Kreis c d in dunklem Felde. Wird das System der Prismen dagegen von der Lichtquelle M M beleuchtet, so gehen die Strahlen durch c d direkt hindurch nach links, während sie von a c und d b nach unten reflektiert werden und in das Auge O fallen. Das Auge sieht also einen dunklen Kreis c d in hellem Felde. Wirken nun beide Lichtquellen zu gleicher Zeit, so wird der Kreis hell auf dunkel oder dunkel auf hell sein, je nachdem von L L oder M M mehr Licht auf das Prismensystem kam, und der Kreis wird sich von seiner Umgebung nicht abheben, sondern ebenso hell sein wie diese, wenn das Prismensystem von beiden Quellen gleich stark beleuchtet ist.

Fig. 431.



Damit die beiden Lichtquellen nicht, wie aus der eben gegebenen Darstellung hervorgeht, unter rechtem Winkel zu dem Photometer zu stehen brauchen, sondern, was viel bequemer ist, in einer geraden Linie mit dem Photometer liegen, wird das Prismensystem in einem Apparat angebracht, den Fig. 432 geöffnet zeigt. Bei AB sieht man in diesem das Prismensystem, welches durch ein kleines Fernrohr r beobachtet wird. Die beiden zu vergleichenden Lichtquellen werfen ihr Licht, jede durch ein Fenster F (das andere, vordere ist in der Figur fortgelassen), auf die beiden Seiten eines Porzellanschirmes P, von welchem nur die eine Seite b sichtbar ist. Das von diesem zurückgeworfene Licht fällt auf je einen Spiegel e und f, und diese werfen das Licht dann in der richtigen Weise durch das Prismensystem. Man muß nun das Photometer so lange auf einer zwischen den beiden Lichtquellen befindlichen Bank verschieben, bis Kreis und Umgebung gleich hell erscheinen. Dann wird das Photometer von beiden Lichtquellen gleich hell beleuchtet, und in diesem Falle verhalten sich die Lichtstärken der beiden Lichtquellen direkt wie die Quadrate ihrer Abstände vom Photometer. Man kann auf diese Weise Lichtstärken miteinander vergleichen. Das Zimmer,

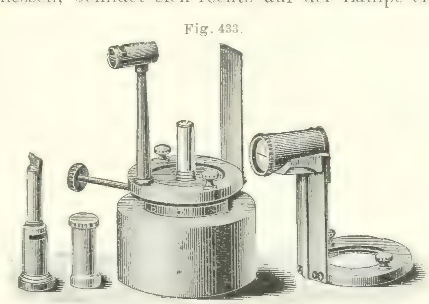
Fig. 432.



in dem die photometrischen Messungen vorgenommen werden, muß natürlich ganz verdunkelt sein, so daß außer von den zu vergleichenden Lichtquellen kein Licht auf das Photometer fällt.

Als Lichteinheit, mit der man alle Lichtstärken vergleichen kann, wird jetzt in Deutschland das Licht einer Lampe benutzt, welche von v. Hefner-Alteneck konstruiert wurde, der Amylacetatlampe. In dieser verbrennt reines Amylacetat durch einen Docht, der etwa 8 mm inneren und 8,1 mm äußeren Durchmesser besitzt. Die Lampe, welche in Fig. 433 abgebildet ist, und die als Hefnersche Normallampe bezeichnet wird, hat, wenn man der Flamme eine Höhe von 40 mm gibt, eine Lichtstärke, welche jetzt unter dem Namen „Hefnereinheit" oder Hefnerkerze (HK) als Einheit benutzt wird. Um die Höhe der Flamme zu messen, befindet sich rechts auf der Lampe ein sogenanntes Flammenmaß. Die Lampe hat den Vorzug der sicheren, stets gleichmäßigen Herstellbarkeit. Eine deutlichere Vorstellung von der Lichtstärke dieser Einheit wird man erhalten, wenn man sich merkt, daß eine gewöhnliche Straßengasflamme oder elektrische Glühlampe eine Helligkeit von ungefähr 16 HK hat.

Fig. 433.

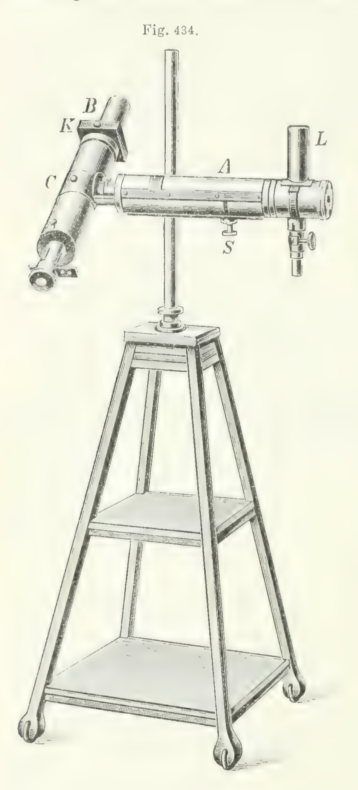


Die Stärke des elektrischen Lichtes hängt natürlich ab von der Stärke des Stromes, welcher durch die Kohlen hindurchgeht, und man kann durch Veränderung der Stromstärke die Helligkeit des Lichtes in sehr weiten Grenzen verändern, von einigen Hundert bis zu vielen Zehntausenden Kerzen Stärke.

Für die Zwecke der Praxis kommt es beim Vergleich verschiedener Lichtquellen weniger auf die Stärke der Lichtquelle selbst an, als auf die Helligkeit, welche sie an der zu beleuchtenden Stelle erzeugt. Natürlich hängt diese Helligkeit, z. B. an den einzelnen Arbeitsplätzen eines Fabriksaales oder an den einzelnen Plätzen eines Schulzimmers ab von der Stärke des Lichtes, welches die beleuchtende Lampe gibt, aber nicht bloß von dieser. Sie hängt auch wesentlich ab von der Entfernung jedes Platzes von der Lampe und bei vergleichenden Untersuchungen wird man z. B. vor die Frage gestellt, ob es vorteilhafter ist, einen Raum durch eine einzige sehr starke Lichtquelle zu erleuchten oder durch eine Anzahl schwächerer, aber zweckmäßig verteilter Lichtquellen. Jedenfalls besteht eine weitere Aufgabe der Photometrie darin, auch die Helligkeit an irgendeiner beleuchteten Stelle zu messen. Für diese Helligkeit muß man auch eine Einheit festsetzen. Denn die Helligkeit einer beleuchteten Fläche hängt einerseits von der Stärke der Lichtquelle, anderseits aber von der Entfernung dieser Fläche von der Lichtquelle ab. Man nimmt nun als Einheit der Helligkeit diejenige, welche eine Fläche besitzt, die von

einer Hefnerkerze in der Entfernung von 1 m beleuchtet wird und nennt diese Helligkeit 1 Lux. Diese Helligkeit ist sehr gering. Für das Lesen und Arbeiten verlangen die Augenärzte mindestens eine Helligkeit von 50 Lux. Eine zweite Aufgabe der Photometrie ist also die Messung der Helligkeit von beleuchteten Flächen. Diese beiden Aufgaben sowohl die Messung der Stärke einer Lichtquelle, wie die Messung der Helligkeit an einer Stelle werden praktisch in sehr bequemer Weise durch das Webersche Photometer gelöst. Dasselbe ist in Fig. 434 auf einem Stativ befestigt abgebildet. Der eigentliche photometrische Meßapparat ist wieder ein Lummer-Brodhunscher Würfel, der bei C angebracht ist, wo das horizontale Rohr A und das drehbare Rohr B ineinander gesteckt sind. An dem Ende L des horizontalen Rohres befindet sich ein Benzinlämpchen, dessen Flammenhöhe einfach reguliert werden kann. Dieses beleuchtet eine Scheibe aus mattem Glas, die im Innern von A sich befindet und durch die Schraube S der Benzinlampe genähert oder von ihr entfernt werden kann. Diese beleuchtete Platte ist die eine Lichtquelle für den Lummer-Brodhunschen Würfel. Zur Messung der Stärke einer Lichtquelle wird das Rohr B gegen diese gerichtet und es werden in das Kästchen K Porzellanplatten oder berußte Glasplatten geschoben, deren Durchlässigkeit ein für allemal geprüft ist. Diese beleuchteten Platten sind die zweite Lichtquelle für den Würfel. Man verschiebt S so lange, bis der mittlere Teil des Bildes gleiche Helligkeit wie der umgebende Ring hat. Mißt man dann weiter den Abstand, den S von der Benzinlampe hat, wozu eine Teilung auf dem Rohr A dient, und mißt man den Abstand der Lichtquelle von K, so kann man daraus die Stärke der Lichtquelle mit derjenigen der Benzinlampe vergleichen, und wenn die letztere ein für allemal in HK bekannt ist, so kennt man dadurch die Stärke der Lichtquelle in Hefnerkerzen.

Fig. 434.



Ebenso mißt man aber auch die Helligkeit einer beleuchteten Fläche in Lux, indem man einfach das Rohr C auf eine weiße Tafel hinrichtet, die man an der betreffenden Stelle aufgestellt hat. Die Helligkeit der von

der Benzinlampe beleuchteten Platte S wird dann durch Verschieben von S gleich der Helligkeit dieser weißen Tafel gemacht, und da man die erstere in Lux kennt, so hat man dadurch auch die gesuchte Helligkeit in Lux ausgedrückt.

Durch die Photometer also sind wir imstande, alle Fragen, die sich auf die Vergleichung der Stärke von Lichtquellen und auf die von den Lichtquellen erzeugten Helligkeiten beziehen, nach Maß und Zahl zu beantworten.

Wenn man einen elektrischen Strom durch zwei Kohlen hindurchsendet, die sich berühren, so ist deren Widerstand nicht groß genug, um eine bedeutende Erwärmung hervorzubringen. Die Kohlenenden kommen nicht ins Weißglühen, es bildet sich gar kein elektrisches Licht. Man muß nach der Berührung die Kohlen etwas trennen, damit sich der elektrische Flammenbogen bildet. Hat man aber nun den Kohlen zuerst einen passenden Abstand gegeben, so daß der Lichtbogen eine passende und brauchbare Länge hat, so vergrößert sich, wenn die Kohlen feststehen, dieser Abstand während des Brennens von selbst fortwährend, weil eben die Kohlen durch das Abbrennen (Verbindung mit dem Sauerstoff der Luft und Zerstäuben) kleiner werden, und es muß bald der Fall eintreten, daß der Strom den Widerstand der Luftschicht nicht mehr überwinden kann. Der Strom hört dann auf und mit ihm das elektrische Licht.

Es war mithin die erste Forderung für die praktische Benutzung des elektrischen Lichtes, die Kohlenstäbe beweglich zu machen, eine Regulierung zu ersinnen, durch welche die Kohlen stets auf gleichen Abstand voneinander gebracht werden. Diese Regulierung muß eine Reihe von Forderungen erfüllen. Erstens muß sie die Kohlenenden, die von selbst beim Brennen in immer größeren Abstand voneinander kommen, immer wieder einander entgegenbringen, so daß das Licht immer wieder in gleicher Stärke sich entwickelt. Zweitens aber müssen die Kohlen zuerst aneinandergeschoben werden, um dem Strom überhaupt den Durchgang zu gestatten und dann gleich getrennt werden, um den Lichtbogen entstehen zu lassen. Auch dies muß die Regulierung besorgen. Drittens muß die Regulierung etwaige Schwankungen in der Stärke des Stromes ausgleichen, d. h. sie muß den Abstand der Kohlen, also den Widerstand der Lampe vergrößern, wenn der Strom zu stark, ihn verkleinern, wenn er zu schwach wird.

Es wurden deshalb schon seit Beginn der Verwendung des elektrischen Lichtes derartige Regulatoren konstruiert, welche man kurz als elektrische Lampen bezeichnet. Es ist selbstverständlich, daß eine so feine Regulierung, welche jeder Schwankung des Stromes folgen muß, nicht möglich ist, ohne daß man den Strom selbst zu dieser Regulierung benutzt. Man hat ja durch die elektromagnetischen Kräfte eines Stromes einfache und bequeme Mittel, welche passende Bewegungen hervorbringen können. Insbesondere sind dies Elektromagnete, welche einen Anker anziehen und Solenoide, welche einen Eisenkern in sich hineinziehen. Sehr einfach ist die Anwendung eines Elektromagneten. Wenn man den Strom, der das Licht erzeugen soll, um einen Kern von weichem Eisen herumführt, und diesem einen beweglichen Anker gegenüberstellt, an dem man die eine Kohle befestigt, so hat man

ja darin einen Mechanismus, welcher je nach der Stärke des Stromes starke oder schwache Bewegungen hervorbringen kann. Wenn aber der Anziehung des Elektromagneten auf seinen Anker keine Kraft entgegenwirken würde, so würde der drehbare Anker stets ganz an den Magneten herangezogen werden. Um dies zu verhindern, muß man der Anziehung des Magneten eine Kraft entgegenwirken lassen, welche den Anker wieder von demselben abzuziehen sucht. Eine solche Kraft hat man z. B. in einer Feder, welche, wenn der Magnet den Anker nach unten zieht, ihn nach oben zu ziehen sucht. Bei einer bestimmten Stellung des Ankers herrscht dann Gleichgewicht zwischen der Anziehung des Magneten und der Feder. Jede Vergrößerung der Stromstärke macht den Magneten stärker, zieht also den Anker herab und spannt dadurch die Feder. Durch diese Herabbewegung des Ankers bringt man nun eine Entfernung der Kohlen voneinander hervor, dadurch wird der Strom schwächer, der Elektromagnet ebenfalls, die Anziehung der Feder überwiegt und bringt dadurch den Anker und die Kohle wieder auf die normale Entfernung.

Ebenso kann man zur elektrischen Regulierung statt eines Elektromagneten mit seinem Anker und der gegenwirkenden Feder vielmehr eine stromdurchflossene Drahtrolle, ein Solenoid, nehmen. Diese zieht ja einen Eisenstab in sich hinein (oben S. 179), und wenn man an dem Eisenstab die eine Kohle befestigt, so wird diese mit bewegt. Befestigt man den Eisenstab an dem einen Ende eines Hebels, einer drehbaren Stange, und die Kohle zusammen mit einem Zusatzgewicht an dem anderen Ende derselben, so kann man durch die Bewegung des Eisenstabes mehr oder minder große Bewegungen der Kohle, je nach dem Zusatzgewicht, erzielen.

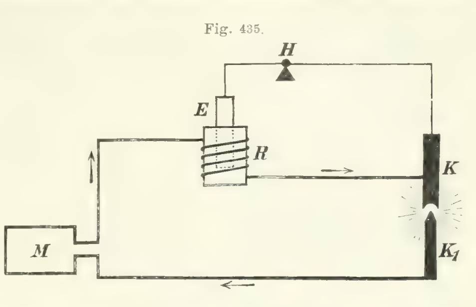
Nach diesen Prinzipien im allgemeinen wurden schon die ersten elektrischen Lampen konstruiert, die aber noch recht kompliziert gebaut waren. Bei den neueren Lampen strebt man im allgemeinen danach, eine möglichst einfache und sichere Konstruktion anzuwenden. Dabei läßt man den Anker des Elektromagneten oder den Eisenkern des Solenoids nicht direkt die eine Kohle bewegen, sondern man richtet es vielmehr so ein, daß der Anker bei seiner Bewegung ein Räderwerk entweder arretiert oder in Bewegung setzt und erst durch dieses Räderwerk läßt man die Kohle bewegen, die sich dann recht gleichmäßig und ruhig verschiebt.

Eine solche elektrische Regulierung, wie sie eben skizziert wurde, ob sie nun mit Elektromagneten oder mit Solenoiden ausgeführt wird, ist in Fig. 435 gezeichnet. Es geht darin der Strom von der Maschine M durch die Regulierungsvorrichtung R und durch die Kohlen $K K_1$ zur Maschine zurück. Kohlen und Regulierungsapparat sind hintereinander geschaltet. Der Eisenkern E und die obere Kohle K sind an einer Stange befestigt, die sich um den Punkt H drehen kann. Vergrößerung der Stromstärke läßt den Eisenkern weiter hineinziehen, treibt also die Kohlen auseinander, wie es sein soll.

Aber eine derartige Anordnung ist nur in speziellen Fällen zu gebrauchen. Eine jede solche Lampe funktioniert nur brauchbar, wenn sie allein im Schließungskreis einer Maschine sich befindet, wenn nicht noch andere Lampen in demselben Stromkreis brennen. Die Regulierung dieser Lampen wird ja dadurch besorgt, daß bei einer Schwächung

des Stromes die Kohlen einander genähert werden, bei Verstärkung des Stromes sie voneinander getrennt werden. Wenn nun zwei oder mehrere Lampen hintereinander in einem Stromkreise sich befinden, so kann man sofort einsehen, daß diese Regulierung dann illusorisch wird. Nehmen wir an, es brennen bloß zwei Lampen hintereinander in demselben Stromkreis. Die erste brenne gerade normal, bei der zweiten seien die Kohlen zu weit auseinander. Dann wird die Regulierung die Kohlen der zweiten Lampe einander nähern, also den gesamten Strom verstärken. Infolge dieser Verstärkung muß nun aber auch die Regulierung der ersten Lampe in Tätigkeit kommen und deren Kohlen auseinander bringen. Jetzt brennt also die zweite Lampe vielleicht normal, während die erste schlecht brennt. Was der einen Lampe nutzt, das schadet der anderen. Es findet ein ewiger Kampf ums Dasein zwischen allen Lampen statt.

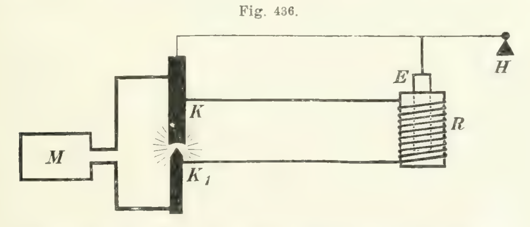
Fig. 435.



Bei der eben betrachteten Anordnung ist die elektrische Regulierungsvorrichtung direkt in den Hauptstromkreis eingeschaltet. Eine solche Regulierung ist also bloß für eine Lampe zu brauchen, die allein in einem Stromkreis brennt, also für eine Lampe für Einzellicht.

Durch eine einfache Änderung der Schaltung kann man aber die hervorgehobenen Mängel mindern. Wenn man, und dies ist das neue

Fig. 436.



Prinzip, den Strom, wenn er in eine Lampe eintritt, teilt, so daß die Regulierungsvorrichtung im Nebenschluß, nicht im Hauptstromkreis liegt, dann ergeben sich nach den Gesetzen der Stromverteilung weit günstigere Verhältnisse. Das Schema für eine solche Stromverteilung ist in Fig. 436 angegeben.

Hier geht der Strom von der Maschine M aus und teilt sich, indem er einerseits durch die Kohlen K K_1, andererseits durch die Regulierungs-

vorrichtung R geht. Der Eisenkern E und die obere Kohle sind an einem einarmigen Hebel befestigt, der sich um H dreht. Die Stromstärken in den beiden Zweigen verhalten sich umgekehrt wie ihre Widerstände, wie wir aus S. 71 wissen. Je größer daher der Widerstand in dem Lichtbogen wird, desto größer wird die Stromstärke in dem Regulierungszweig, desto kräftiger wird der Eisenkern hineingezogen und zugleich die obere Kohle der unteren genähert. Wie groß dagegen der Strom in Wirklichkeit ist, der in die beiden Zweige eintritt, darauf kommt es viel weniger an. Die Regulierung kommt hauptsächlich in Tätigkeit durch die Vorgänge in der eigenen Lampe. Stromschwankungen von außen ändern die Stromstärken in den beiden Zweigen in gleichem Verhältnis, beeinflussen daher die Regulierung in viel geringerem Maße als bei der früheren Schaltung. Allerdings ist das nur bei ganz geringen äußeren Stromschwankungen der Fall, wie man ja sofort durch die Betrachtung des Grenzfalles sehen kann, daß, wenn der Strom außerhalb sehr schwach wird, natürlich auch die Regulierung sehr schwach werden muß. Die Praxis hat es aber hauptsächlich mit kleinen Stromschwankungen zu tun.

Das Solenoid oder der Elektromagnet muß bei Lampen dieser Art, die man Nebenschlußlampen nennt, mit sehr vielen Windungen eines dünnen Drahtes umwickelt sein, damit trotz des schwachen Stromes doch die elektromagnetische Wirkung, die ja von der Zahl der Amperewindungen (S. 171) abhängt, genügend groß sei.

Indes auch bei diesen Nebenschlußlampen ist der Einfluß äußerer Stromschwankungen zwar geschwächt, aber nicht ganz vermieden; vielmehr wirken äußere Stromschwankungen auch hier störend auf die Regulierung, wenn auch in geringerem Grade. Wird z. B. der Strom, der in die Lampe kommt, aus irgendwelchen äußeren Ursachen zu stark, so werden auch die beiden Zweigströme stark, das Licht brennt also stärker als normal, aber auch der Regulierungsmagnet ist stärker als im normalen Zustand. Je stärker der Magnet ist, desto mehr zieht er die Kohlen aneinander. Es wird also dann das zu starke Licht noch stärker, und umgekehrt ist es bei zu schwachem Licht. Es werden also äußere Stromschwankungen durch die Regulierung nicht ausgeglichen. Auch hierbei schädigen die Stromschwankungen im äußeren Stromkreis noch jede einzelne Lampe, wenn auch in viel geringerem Maße als bei den Lampen, welche die Regulierung nicht im Nebenschluß haben.

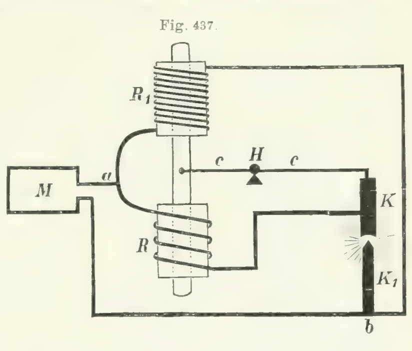
Eine vollkommene gegenseitige Unabhängigkeit aber vieler Lampen, die in einen Stromkreis hintereinander eingeschaltet sind, wurde erst erreicht durch eine Einrichtung, die von Hefner-Alteneck angegeben wurde, die das aufgestellte Problem wirklich löste und die zum erstenmal in der Tat ein vorzügliches Brennen mehrerer Lampen in einem Stromkreise gestattete. Dies wurde erreicht durch eine besondere Schaltung und Regulierung. Die Lampen, welche diese Einrichtung besitzen, nennt man Differentiallampen. Sie wurden zuerst von Siemens & Halske bei ihren vielen Beleuchtungsanlagen eingeführt.

Auch bei der Differentiallampe wird der Strom, der von der Maschine kommt, verzweigt. In dem einen Zweig befinden sich die Kohlen, in dem anderen eine Regulierungsvorrichtung. Die wesentliche Veränderung

ist aber die, daß auch in dem ersten Zweig, in welchem sich die Kohlen befinden, eine Regulierungsvorrichtung angebracht ist, und zwar so, daß sie der anderen entgegenwirkt. Durch das Schema in Fig. 437 wird die Wirkung der Differentiallampe deutlich werden.

Von der Maschine M geht der Strom nach a und b und teilt sich dort. Der Hauptstrom geht über das Solenoid R und durch die Kohlen K und K_1 nach b, der Nebenstrom geht über das Solenoid R_1 nach b. Ein Eisenzylinder taucht in beide Solenoide ein. An ihm ist ein Hebel c c befestigt, der sich um den Punkt H drehen kann und der die obere Kohle K trägt. Wird der Strom im Solenoid R_1 stärker, so wird der Eisenstab in dieses hineingezogen und dadurch die obere Kohle gesenkt. Wird der Strom in R stärker, so wird der Eisenzylinder in dieses hineingezogen und die Kohle K hebt sich. Auf diese Weise ist die Differentialwirkung der beiden Spulen sehr einfach hergestellt.

Fig. 437.



Die Stromstärke im äußeren Stromkreis wird bei dieser Regulierung nicht beeinflußt. Denn die Kohlen stellen sich immer auf normalen Widerstand ein. Durch die Vorgänge in einer Lampe werden also die anderen nicht in Mitleidenschaft gezogen. Der äußere Stromkreis ist daher unabhängig von den Vorgängen in der Lampe und umgekehrt.

So kann man also mit Hilfe des Differentialprinzips eine Reihe von Lampen hintereinander in den Stromkreis einschalten, ohne daß sie ihre Regulierung gegenseitig schädigen.

Wir können die Unterschiede der drei Lampengattungen, der Hauptstrom-, Nebenschluß- und Differentiallampen leicht in folgender Weise uns klarmachen.

Wenn der Eisenstab im Solenoid einer Hauptstromlampe durch das Zusatzgewicht einmal in bestimmte Lage eingestellt ist, so bewegt er sich so lange nicht, als die Stromstärke, die in den Windungen des Solenoids, also auch durch die Kohlen fließt, konstant bleibt. Wird dagegen diese Stromstärke stärker oder schwächer, so reguliert das Solenoid, es sucht also immer die Stromstärke konstant zu halten. Eine Hauptstromlampe reguliert auf konstante Stromstärke. Da nun aber, wenn mehrere Lampen vorhanden sind, wohl die Stromstärke in allen konstant sein kann, während doch die Abstände der Kohlen, die Widerstände, sich in den einzelnen Lampen ändern, so erklärt sich, warum die Hauptstromlampen nur einzeln gut funktionieren können.

Bei den Nebenschlußlampen wird der Eisenstab des Solenoids so lange nicht bewegt, als der Strom im Nebenschluß konstant

bleibt, dagegen wird er bewegt, wenn der Strom im Nebenschluß größer oder kleiner wird. Da nun der Nebenschluß (die Wickelung des Regulierungssolenoids) unveränderlichen Widerstand hat, so hängt die Stromstärke im Nebenschluß nur davon ab, wie groß die Spannungsdifferenz an den Anlegepunkten des Nebenschlusses ist. Da er nun immer zu den Kohlen parallel geschaltet wird, so erkennt man, daß die Lampe nicht reguliert, wenn die Spannung an den Kohlen denselben Wert behält, und daß sie reguliert, wenn diese Spannung sich ändert. Eine Nebenschlußlampe reguliert also auf konstante Spannung. Da nun die Spannungsdifferenz zwischen den Kohlen gleich dem Produkt aus der Stromstärke und dem Widerstand ist, so sieht man, daß auch dabei mehrere Lampen hintereinander sich noch stören müssen. Wird der Widerstand in einer Lampe zu groß, also ihr Strom zu klein, so wird der Strom auch in den anderen Lampen zu klein, und daher wird deren Widerstand durch Auseinanderschieben der Kohlen zu groß. Zwei solche Lampen, hintereinander geschaltet, brennen also dann beide zu dunkel oder zu hell. Wenn dagegen die Lampen einzeln parallel geschaltet werden und man die Spannung an den Endpunkten der Parallelleitungen, wie es jetzt immer geschieht, konstant hält, so brennen die Lampen vortrefflich, und auch zwei solche Lampen hintereinander regulieren sich noch gut ein, wenn ihre Zusatzgewichte richtig für die Stromstärke eingestellt sind.

Endlich bei den Differentiallampen wird durch die Regulierung bewirkt, daß das Verhältnis zwischen der Spannung (in der Nebenspule) und der Stromstärke (in der Hauptspule) dasselbe bleibt. Dieses Verhältnis ist aber der Widerstand der Lampe. Eine solche Lampe bewirkt also, daß der Widerstand zwischen den Kohlen immer derselbe ist. Die Differentiallampe reguliert auf konstanten Widerstand. Daher behalten eine Reihe von Differentiallampen, die hintereinander geschaltet sind, immer denselben Widerstand. Daher eignen sie sich besonders vor allen Lampen zur Serienschaltung.

Alle gebräuchlichen Lampen sind nun entweder Hauptstromlampen oder Nebenschlußlampen oder endlich Differentiallampen. Am häufigsten werden die Differentiallampen benutzt, die die beste Regulierung besitzen. Die Konstruktionen der einzelnen Fabriken unterscheiden sich in bezug auf den elektrischen Teil der Regulierung nur wenig, dagegen erheblich in bezug auf den mechanischen Teil.

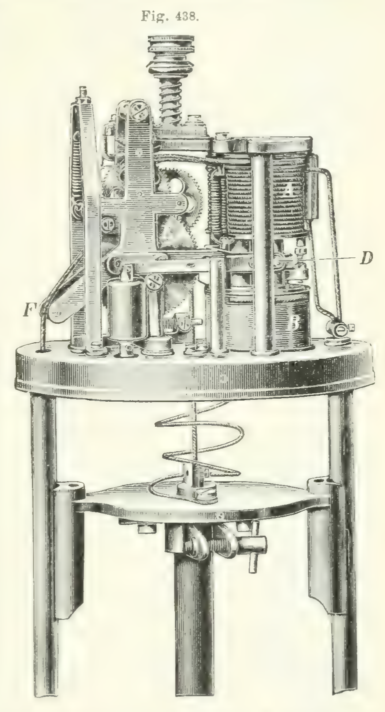
Bei den Differentiallampen und den Nebenschlußlampen muß, wenn mehrere Bogenlampen hintereinander geschaltet werden sollen, noch eine Vorrichtung angebracht sein, um eine Lampe vollkommen aus dem Stromkreis auszuschalten, wenn sie aus irgend einem Grunde, z. B. wenn eine Kohle abbricht, ganz erlischt. Sonst würde nämlich der gesamte Strom durch den anderen Zweig der Zweigleitung gehen, nämlich durch das Solenoid mit den vielen dünnen Drahtwindungen, und diese stark erhitzen und durchbrennen und andererseits selbst so geschwächt werden, daß die übrigen Lampen erlöschen. Deswegen wird dem Strom für den Fall des Erlöschens noch ein anderer Weg geboten, als durch die dünne Nebenschlußspule. Gewöhnlich zieht dann ein kleiner Magnet, der erst stark genug wird, wenn der verstärkte Strom ihn umfließt, seinen

Anker an, der dann seinerseits einen dicken Draht an Stelle der gebrochenen Kohle einschaltet.

Außer der elektrischen Regulierung ist bei allen Lampen noch immer eine rein mechanische Regulierung vorhanden, die natürlich bei den einzelnen Systemen vielfache Verschiedenheiten aufweist. Es handelt sich bei der mechanischen Regulierung immer darum, die durch die elektrische Regulierung hervorgebrachten Bewegungen eines Ankers oder eines Eisenkerns zunächst auf ein Räderwerk hemmend oder lösend wirken zu lassen, und erst durch dieses von selbst ablaufende Räderwerk die Bewegung der Kohlen hervorzubringen, die dann recht ruhig und stetig vor sich geht.

Einige solche Lampen sollen als Beispiel angeführt werden.

Fig. 438.

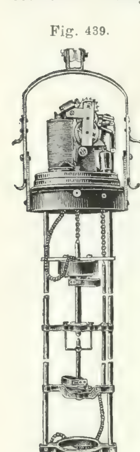


Von der Differentialbogenlampe der Siemens-Schuckertwerke zeigt Fig. 438 den Mechanismus in perspektivischer Ansicht. Der elektrische Teil besteht aus vier Spulen A und B (in der Figur sind nur zwei sichtbar), von denen die oberen zwei, wie man aus der Drahtdicke erkennt, im Hauptstrom, die unteren zwei im Nebenschluß liegen. Ein Eisenkörper, der wie ein römisches H gebildet ist, hat vier Schenkel, die in die vier Spulenöffnungen hineinreichen. Der ganze Eisenkörper ist in einer Gabel D gelagert, welche bei ihrer Bewegung das Laufwerk arretiert oder losläßt. Über eine mit dem Räderwerk verbundene Scheibe E ist ein Seil F gelegt, das an seinen beiden Enden die beiden Kohlenhalter trägt. Durch das Übergewicht des oberen Kohlenhalters wird das Laufwerk in Bewegung gesetzt, bis die Kohlen zusammentreffen. In diesem Moment geht ein starker Strom durch die Hauptspulen oben, diese ziehen den Eisenkörper in sich hinein und ziehen dadurch die Kohlen auseinander, die nun durch die Differentialregulierung zum langsamen Nachrücken von beiden Seiten gebracht werden. In ähnlicher Weise wird von dieser Firma eine Nebenschlußlampe gebaut.

Die Nebenschlußlampe der A.E.G. in Berlin ist in Fig. 439 abgebildet. Die elektrische Regulierung wird durch einen Elektromagneten hervorgebracht, der seinen Anker anzieht. Man sieht den Elektromagneten,

mit dünnem Draht versehen, links in der Figur. Solange die Kohlen sich nicht berühren, fließt der Strom um den Elektromagneten, der Anker wird heruntergezogen. Dadurch wird bewirkt, daß das Räderwerk, das bis dahin festgehalten war, sich loslöst, daß die Räder sich drehen und daß daher die Kohlenhalter sich zu bewegen anfangen. Diese sind nämlich an einer Kette befestigt, welche über eines der Räder gelegt ist. Infolge der Kettenverbindung bleibt bei der Bewegung der Kohlenhalter der Brennpunkt immer an derselben Stelle. Die Kohlen laufen also zusammen. Im Moment, wo sie sich berühren, wird der Elektromagnet stromlos und nun wird durch eine Feder der Anker wieder gehoben, so daß die Kohlen sich trennen und der Lichtbogen sich bildet. Bei weiterem Abbrennen der Kohlen wird die Kraft des Elektromagneten wieder stärker und zieht den Anker tiefer, bis wieder das Rädersystem losgelöst ist und die Kohlen sich wieder nähern. In dieser Weise geht das Spiel fort. Auch eine Differentiallampe wird von der Allgemeinen Elektrizitäts-Gesellschaft in ähnlicher Weise gebaut.

Fig. 439.



Wo es sich bei den Beleuchtungsanlagen nur um Bogenlicht allein handelt, da werden zweckmäßig viele Bogenlampen hintereinander geschaltet, weil das Leitungsmaterial dann am billigsten ist. Für diesen Fall ist die Differentiallampe die allein anwendbare.

Auch bei der Parallelschaltung von Bogenlampen benutzt man meistens Differentiallampen, und zwar werden, wenn in den Hauptleitungen eine Spannung von 110 Volt herrscht, wie es gewöhnlich bei großen Stadtbeleuchtungen der Fall ist, zwei solche Bogenlampen hintereinander in eine Leitung geschaltet, so daß lauter parallele Gruppen von je zwei Lampen vorhanden sind.

Die Spannungsdifferenz, die an den Enden der Kohlen herrscht, ist je nach der Stromstärke, mit der die Lampen betrieben werden, und je nach der Länge des Lichtbogens etwas verschieden. Folgende Tabelle gibt für einen bestimmten Fall zusammengehörige Werte von Stromstärke (in Ampere) und Spannung an den Klemmen der Lampe (in Volt), wenn man der Lampe die jedesmal passende Länge des Lichtbogens gibt.

Stromstärke . .	3,	6,	9,	12,	15,	20,	30,	40 Ampere.
Klemmenspannung	36,	38,	41,	42,	43,	44,	45,	52 Volt.
Lichtbogenlänge .	0,7	1,6	2,5	3,2	3,5	4,2	5,0	6 mm.

Wenn daher zwei Bogenlampen hintereinander in einen Zweig von 110 Volt Spannung brennen sollen, so muß man immer noch einen Zusatzwiderstand in denselben Kreis einschalten, der die übrige Spannung aufnimmt. Sollen z. B. zwei Lampen hintereinander mit je 12 Ampere brennen und ist die Spannung des Netzes gleich 110 Volt, so verbrauchen die Lampen davon bloß 84 Volt. Man muß daher einen Widerstand so wählen, daß der Spannungsverlust in ihm bei 12 Ampere Stromstärke gleich 26 Volt ist, d. h. er muß 2,2 Ohm groß sein. Wenn sich der Abstand der Kohlen in einer Lampe und damit der Widerstand ändert, so hat

diese Änderung einen geringeren Einfluß auf die Stromstärke, wenn noch ein Zusatzwiderstand vorhanden ist, als wenn keiner vorhanden wäre. Denn der gesamte Widerstand des Lampenzweiges ist dann eben die Summe aus dem konstanten Zusatzwiderstand und dem variablen Lampenwiderstand. Diese Zusatzwiderstände bestehen einfach aus nackten Drähten, die auf eine isolierende Unterlage aufgewickelt sind und die in die Zuleitung zu den Lampen an irgend einer Stelle eingeschaltet werden. Sie werden gewöhnlich mit einer Blechkappe versehen. Beim ersten Einregulieren einer Lampe wird die Länge der für den Zusatzwiderstand erforderlichen Drähte durch Ausprobieren gefunden. Zuweilen bringt man jetzt in ein Netz von 110 Volt Spannung drei Lampen hintereinander ohne Zusatzwiderstand an, wobei wegen der geringeren Spannung, die auf jede kommt, die Länge des Lichtbogens und dadurch auch die Lichtstärke jeder Lampe reduziert werden muß.

Die Brenndauer einer Bogenlampe hängt natürlich ab von der Länge und Dicke der Kohlenstäbe, die man in die Lampe einsetzt. Denn infolge der hohen Temperatur des Lichtbogens verbinden sich die Kohlen mit dem Sauerstoff der Luft und brennen allmählich ab. Man kann durchschnittlich rechnen, daß von jeder Kohle zirka 20 mm in der Stunde abbrennen. Für verschiedene Stromstärken nimmt man die Kohlen verschieden dick, und zwar, wie oben erwähnt, die positive Kohle mit doppelt so großem Querschnitt wie die negative. Gewöhnlich werden die Kohlen so lang genommen, daß die Lampe 6 bis 10 Stunden brennt. Man hat aber auch mit Erfolg versucht, die Brenndauer der Lampen wesentlich zu vergrößern, und man erreicht das, indem man den Luftzutritt zum Lichtbogen beschränkt. Man schließt nämlich den Lichtbogen in eine besonders enge Glasglocke ein, zu der der Sauerstoff der Atmosphäre nicht hinzu kann. Mit solchen Dauerbrandbogenlampen kann man Brenndauern bis 150 Stunden erreichen. Die Spannung des Lichtbogens ist bei diesen eine bedeutend höhere als bei den Lampen mit offenem Lichtbogen, nämlich pro Lampe 70 bis 80 Volt. Fig. 440 zeigt die Form einer solchen engen Glasglocke G, in der der Lichtbogen sich befindet. Die ganze Lampe wird gewöhnlich noch mit einer größeren Glasglocke umgeben.

Fig. 440.

G

Wir haben bisher wesentlich von dem Betrieb der Bogenlampen mit Gleichstrom gesprochen. Wie schon erwähnt, läßt sich das Bogenlicht aber ebensogut durch Wechselströme erzeugen. Auch kann man dabei die Regulierung im wesentlichen ebenso gestalten wie bei Gleichströmen. Denn die elektrische Regulierung wird ja immer durch die Anziehung eines Elektromagneten auf seinen Anker oder durch die Einziehung seines Eisenkerns in eine Spule bewirkt. Ein Elektromagnet zieht aber weiches Eisen sowohl mit seinem Nordpol, wie mit seinem Südpol an, weil in dem Eisen immer der entgegengesetzte Pol induziert wird und eine Spule zieht den Eisenkern immer hinein, ob sie nun von dem Strom

in der einen oder in der anderen Richtung durchflossen wird. Daher wirken beide Arten der Regulierung auch bei Wechselströmen. Nur muß man dann das Eisen des Elektromagneten wegen der Wirbelströme zerteilen.

Eine andere Art der Regulierung zeigt die Motorlampe für Wechselstrom der A.E.G. Von dieser gibt Fig. 441 eine Abbildung des Werkes, während Fig. 442 dasselbe mehr schematisch darstellt. Eine runde Aluminiumscheibe A ist drehbar an einer Achse befestigt. Sie

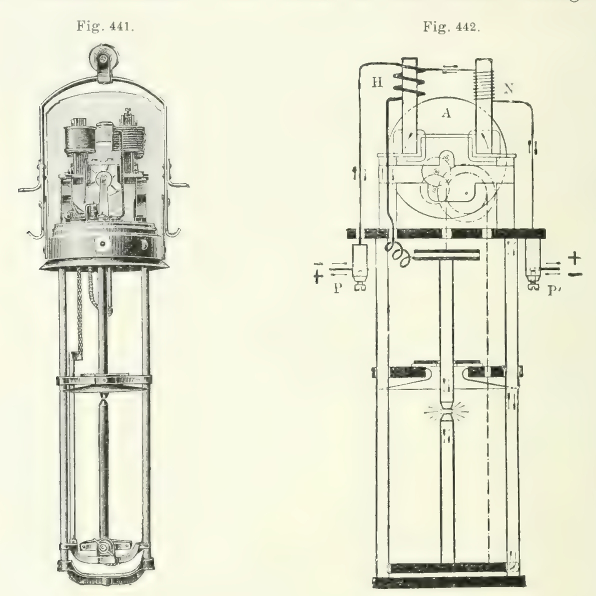


Fig. 441. Fig. 442.

dreht sich zwischen den Polschuhen eines Hauptstromelektromagneten H und eines Nebenschlußelektromagneten N, die zu beiden Seiten der Achse angeordnet sind. Die Pole dieser Magnete sind mit Kupferplatten zum Teil bedeckt. Wenn die Wechselströme fließen, so werden sowohl in diesen Kupferflächen, wie in der Aluminiumscheibe Induktionsströme erregt und diese bewirken eine Drehung der beweglichen Scheibe. Mit der Scheibe sind durch Räderübersetzung die Kohlen verbunden. Der Hauptstromelektromagnet bewirkt, daß die Kohlen auseinandergehen, der Nebenschlußelektromagnet, daß sie zusammengehen. Der Strom wird bei P und P' eingeführt.

In einigen Beziehungen findet ein Unterschied im Bogenlicht statt, wenn es von Wechselströmen und wenn es von Gleichströmen erzeugt wird. Zunächst darin, daß beim Gleichstrom die Hauptmenge des Lichtes von selbst nach unten geworfen wird, weil die obere positive Kohle einen

Krater bildet. Bei Wechselströmen muß man dies künstlich erreichen, indem man über dem Lichtbogen eine spiegelnde Fläche, einen Reflektor, anbringt, der das nach oben gestrahlte Licht nach unten wirft. Als Kohlen verwendet man für beide Elektroden Dochtkohlen.

Ferner ist die Spannung an den Kohlen bei Wechselstromlampen, wie schon oben S. 463 angeführt wurde, eine kleinere, als bei Gleichstrom. Sie ändert sich auch hier mit der Stromstärke und der Lichtbogenlänge, und es sind in der folgenden Tabelle zusammengehörige Werte von Stromstärke, Spannung und Lichtbogenlänge angegeben, die aber für die verschiedenen Arten des Wechselstromes erhebliche Veränderungen zeigen:

Stromstärke . .	6,	10,	15,	20,	35	Ampere.
Spannung . . .	28,	29,	31,	32,	34	Volt.
Lichtbogenlänge .	1,5	1,7	1,9	2,3	2,7	mm.

Selbstverständlich muß daher eine Wechselstromlampe bei gleicher Stromstärke weniger Licht aussenden als eine Gleichstromlampe. Denn die von der Lampe verbrauchte Energie bei Gleichstrom ist ungefähr 45 Volt mal der Stromstärke, bei Wechselstrom aber bloß zirka 30 Volt mal der Stromstärke. Daher kann auch die erzeugte Lichtmenge bei Wechselstrom nur ungefähr $^2/_3$, also zirka 66 Proz. derjenigen sein, die bei gleicher Stromstärke vom Gleichstrom erzeugt wird. Aber auch bei gleichem Effektverbrauch, bei derselben Anzahl von Watt, ist die von einer Wechselstrombogenlampe ausgesandte Lichtmenge kleiner als bei einer Gleichstromlampe. Das kommt daher, daß die Temperatur der Kohlen nicht so hoch wird, wie bei Gleichstrom. Denn da der Wechselstrom abwechselnd die maximale Stromstärke und dann die Stromstärke Null besitzt, so findet nach jeder maximalen Erhitzung wieder eine, wenn auch momentane, Abkühlung der Kohlen statt und daher steigt die Temperatur im Mittel nicht so hoch, wie bei dauerndem Gleichstrom.

Um mehrere Wechselstromlampen von zirka 30 Volt Spannung hintereinander in einen Stromkreis zu legen, der, wie häufig, 110 Volt Spannung hat, kann man die übrig bleibende Spannung auch wie bei Gleichstrom durch einen Zusatzwiderstand aufnehmen lassen. Aber man hat bei Wechselstromlampen einfache Mittel, um ohne große Verluste sogar auch bloß eine Lampe oder deren zwei in eine Leitung von 110 Volt einzuschalten. Es kommt ja darauf an, der Spannung an den Kohlen den richtigen Wert von etwa 30 Volt zu geben, während die Leiter, an welche die Lampe angelegt ist, etwa 110 Volt Spannung haben. Das kann man bei Wechselströmen dadurch erreichen, daß man in die Leitung der Lampe eine Drosselspule (S. 229) einschaltet. Eine solche ist ja nichts weiter als ein Elektromagnet mit kleinem Widerstand der Bewickelung. Durch den Eisenkern wird die Selbstinduktion der Rolle sehr groß gemacht. Daher entstehen in dieser starke Induktionsströme, welche den vorhandenen Wechselströmen entgegenwirken und diese schwächen. Das Resultat ist dasselbe, als wenn die Spannung an den Enden der Lampe verringert wäre. Diese Verringerung der Spannung ist aber hierbei nicht, wie bei der Benutzung eines Zusatzwiderstandes, mit einem großen Verlust an Effekt verbunden. Denn verloren geht nur

diejenige Arbeit, die für die Joulesche Wärme verbraucht wird, und diese ist gering, da der wirkliche Widerstand der Drosselspule klein ist. Außerdem wird noch Arbeit wegen der Hysteresis des Eisenkernes verbraucht. Aber diese Arbeitsverluste sind viel geringer, als wenn die ganze Spannung bloß durch Widerstand verringert würde. Eine solche Drosselspule zeigt Fig. 443. Sie ist gewöhnlich, wie in Fig. 444, mit einem Schutzgehäuse umgeben. Die Drosselspulen müssen für den vorhandenen Strom und die vorhandene Frequenz besonders abgemessen werden.

Ein zweites Mittel, um Wechselstrombogenlampen in ein Leitungsnetz von beliebiger Spannung einzuschalten, besteht darin, daß man einen kleinen Transformator anwendet, dessen primäre Spule die große Spannung (110 Volt) aufnimmt und dessen sekundäre Spule die kleine Spannung (30 oder bei 2 Lampen 60 Volt) liefert. Entsprechendes gilt natürlich für andere Leitungsspannungen. Der Vorteil, den man durch eine solche Transformation erzielt, wird aus folgender Berechnung klar werden. Es soll eine einzelne Bogenlampe für 12 Ampere an ein Leitungsnetz für Wechselstrom von 110 Volt angeschlossen werden. Die Bogenlampe braucht für sich einen Effekt von zirka $30 \times 12 = 360$ Watt. In der ganzen Leitung würden aber bei 12 Ampere Stromstärke $110 \times 12 = 1320$ Watt vorhanden sein, folglich müßte man einen Zusatzwiderstand anwenden, der 960 Watt konsumiert, und diese würden dauernd nutzlos verloren gehen. Wendet man aber einen Transformator an, so würde an dessen sekundären Klemmen eine Spannung prinzipiell von 30 Volt, in Wirklichkeit aber von etwa 40 Volt herrschen müssen. Da die Spannung von 110 Volt auf 40 Volt heruntertransformiert wird, so braucht in der primären Wickelung des Transformators nur die Stromstärke $12 \times \frac{40}{110} = 4{,}4$ Ampere zu herrschen. Folglich ist der Effekt in der primären Wickelung bloß $4{,}4 \times 110 = 484$ Watt, es ist also ein sehr viel kleinerer Effektverlust vorhanden. Solche kleine Transformatoren werden von den verschiedenen Fabriken bei ihren Wechselstromanlagen benutzt. Eine ganz ähnliche Rechnung läßt sich auch für die Drosselspulen ausführen.

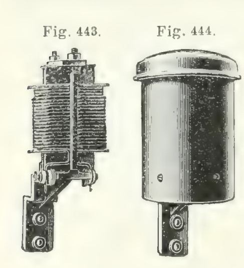


Fig. 443. Fig. 444.

Der Verbrauch der Bogenlampen an elektrischer Energie im Verhältnis zu der erzeugten Lichtstärke ist für die verschiedenen Lampen etwas verschieden. Als mittlere Zahl kann man annehmen, daß eine Bogenlampe bei Gleichstrom für jedes Ampere, das sie verbraucht, etwa 100 Normalkerzen Lichtstärke gibt. Da nun eine solche Lampe an ihren Klemmen ungefähr 40 bis 50 Volt Spannung braucht, im Mittel 45 Volt, so folgt, daß man in einer Lampe für etwa 45 Watt 100 Kerzen erhält. Abzüglich der Verluste in den Zuleitungen kann man also durchschnittlich pro Pferdekraft (736 Watt) ein Licht von etwa 1200 Normalkerzen Stärke erhalten.

In den letzten Jahren hat sich die Technik aber mit Erfolg bemüht, die Lichtstärke der Lampen bei gleichem Effektverbrauch zu erhöhen.

Denn da das Bedürfnis nach guter und glänzender Beleuchtung seit Einführung des Bogenlichts immer mehr anstieg, so begnügte man sich für gute Beleuchtung von Straßen, Sälen, Schaufenstern nicht mehr mit Lampen, die 1000 Kerzen Lichtstärke gaben, sondern man wollte, ohne erheblichen Mehrverbrauch, solche mit größerer, etwa doppelter Lichtstärke und womöglich noch mehr haben. Dieses Verlangen wurde zuerst von Bremer dadurch befriedigt, daß er den Kohlen der Lampe Stoffe beimengte, die bei der großen Hitze im Lichtbogen selbst unter Entwicklung großer Helligkeit verdampften. Man bezeichnet jetzt derartig präparierte Kohlen als Effektkohlen. Es sind das gewöhnliche Kohlenstäbe, welche aber mit bestimmten Substanzen, Fluorsalzen des Calcium, Barium, Strontium usw. in solchen Mengen imprägniert sind, daß in dem Lichtbogen einer solchen Lampe nicht bloß die weißglühende Kohle Licht aussendet, sondern daß auch die Dämpfe der imprägnierten Substanzen strahlen. Diese Metalldämpfe leuchten je nach ihrer Natur in verschiedenen Farben. Man erhält durch Calciumsalze gelbes, durch Strontiumsalze rotes und durch Bariumsalze milchweißes Licht. Und diese Färbung hat nicht bloß den Vorteil, daß sie das Licht der Bogenlampe, das an sich wegen seines Reichtums an blauen Strahlen kalt erscheint, bedeutend wärmer macht, sondern sie hat auch noch den weiteren Vorteil, daß sie die Helligkeit des Lichtes bei gleicher Stromstärke bedeutend steigert. Weil nämlich die verdampfenden Salze den Strom ziemlich gut leiten, kann man die Länge des Lichtbogens bedeutend größer machen und daher größere Helligkeit erzielen. Gelb brennende Lampen haben mehr als doppelt, rot und milchweiß brennende Lampen etwa $1^1/_2$mal so große Helligkeit, bei gleichem Energieaufwand, wie die gewöhnlichen Bogenlampen. Diese Erhöhung der Ökonomie kommt auch zum Teil daher, daß diese Salze wesentlich nur sichtbare Strahlen aussenden, während in dem Lichtbogen der weißglühenden Kohlen auch sehr viele Strahlen enthalten sind, die unser Auge nicht affizieren, also nicht sichtbar sind und daher in Bezug auf die Helligkeit nicht zählen. Zur Erhöhung des Glanzes dieser Effektbeleuchtung werden die Glocken für diese Lampen gewöhnlich sehr klein gewählt, wodurch noch mehr der Eindruck größerer Helligkeit erzielt wird. Die Effektkohlen, wie sie nach dem Vorgang von Bremer von vielen Fabriken hergestellt werden, haben einen Docht aus diesen Salzen, dessen Durchmesser nur etwa $^1/_5$ von dem des Kohlendurchmessers ist, also ziemlich dünn ist. Dagegen hat zuerst Blondel Kohlen hergestellt, bei denen dieser Docht sehr dick ist, so daß seine Dicke etwa $^2/_3$ der ganzen Kohlendicke ausmacht und diese Kohlen haben sich sehr bewährt. Sie sind in Deutschland unter der Bezeichnung Blondelkohlen oder T. B.-Kohlen eingeführt.

Die mit solchen Kohlen ausgerüsteten Lampen nennt man Flammenbogenlampen. Um die Beleuchtung nach unten dabei noch intensiver zu machen, werden diese Lampen meistenteils so konstruiert, daß die beiden Kohlen nicht übereinander stehen, sondern schräg gegeneinander laufen. Fig. 445 zeigt das Innere einer solchen und zwar einer Wechselstromlampe der A.E.G., deren Mechanismus der der oben beschriebenen Motorlampe ist. Bei den Lampen mit schräg stehen-

den Kohlen wird durch die sich drehende Scheibe zunächst eine Führungsstange vertikal auf und ab bewegt, und diese trägt ein Querstück mit den beiden schräg gegeneinander gerichteten Kohlen, welche bei der Aufwärtsbewegung der Stange den Lichtbogen zwischen sich entstehen lassen und dann langsam gegeneinander rücken. Die Flammenbogenlampen haben die Unannehmlichkeit, daß sie belästigende und schädliche Dämpfe aussenden. Sie sind deshalb im Innern geschlossener Räume nicht zu brauchen, auch muß das Regulierwerk bei ihnen sorgfältig abgeschlossen werden, um nicht durch die Dämpfe zu leiden.

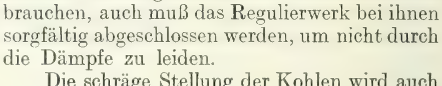


Fig. 445.

Die schräge Stellung der Kohlen wird auch manchmal bei gewöhnlichen Bogenlampen angewendet, die mit Reinkohlen brennen. Umgekehrt werden aber auch Flammenbogenlampen, namentlich solche mit T. B.-Kohlen, mit übereinanderstehenden Elektroden gebaut. Da die Glocken dieser Lampen sich mit den Dämpfen stark beschlagen, so werden jetzt als Neuerung ventilierte Glocken für derartige Lampen benutzt, bei denen eine Luftströmung so geführt ist, daß sie das Beschlagen der Glocke verhindert.

Erhebliche Fortschritte in der Konstruktion von Bogenlampen hat man in den letzten Jahren insofern gemacht, als man Lampen konstruierte, die gar kein Uhrwerk mehr besitzen und die doch eine regelmäßige und sanfte Bewegung der Kohlen erzielen. Vollständig ohne Mechanismus sind derartige Lampen allerdings nicht, da sie immer noch einen Elektromagneten od. dgl. haben müssen, um die sich zuerst berührenden Kohlen auseinanderzuziehen, und dadurch den Lichtbogen entstehen zu lassen. Aber der sanfte und allmähliche Nachschub der Kohlen läßt sich auch ohne Uhrwerkmechanismus erzielen. Die erste derartige Lampe, die Becklampe, wird von der Deutschen Beckbogenlampengesellschaft in Frankfurt a. M. gebaut. Die eine Kohle nämlich ist bei dieser Lampe mit einer Rippe aus Kohle versehen, mit welcher sie auf einer unten an der Lampe angebrachten Auflage aus Metall aufliegt. Beim allmählichen Abbrennen der Kohlen brennt diese Rippe ebenfalls ab, so daß die Kohle durch ihr eigenes Gewicht in Pausen von wenigen Sekunden heruntersinkt. Die andere Kohle, eine gewöhnliche Rundkohle, ist schief gegen die erstere gestellt und mit ihr so verbunden, daß sie ebenfalls in gleichem Tempo sinkt. Fig. 446 zeigt das Innere der Lampe (ohne Kohlen). Der ganze Mechanismus beschränkt sich auf einen Elektromagneten, der bei Erregung einen Kern in sich hineinzieht und dadurch die vorher sich berührenden Kohlen trennt und so den Lichtbogen entstehen läßt. Das Vorrücken der Kohlen geschieht

dann, vermöge der Abbrennrippe, wie erwähnt, ganz automatisch. Ähnliche Lampen ohne Regulierwerk werden jetzt auch von anderen Firmen gebaut.

Eine besondere Form hat unter diesen die Timar-Dreger-Lampe, welche von der Gesellschaft für elektrotechnische Industrie in Berlin gebaut wird. Diese Lampe ist nämlich sehr flach gehalten, so daß sie sich besonders für niedrige Räume, wie etwa auf Schiffen eignet. Fig. 447 zeigt eine Ansicht dieser Lampe, mit geöffnetem Glasdeckel. Die flache Form kommt dadurch zustande, daß die beiden Kohlen parallel übereinander in geringem Abstand angeordnet sind. In jeder Lampe sind zwei Paar Kohlen vorhanden, die je um eine Achse (auf der linken Seite der Figur sind diese mit a_1 a_2, rechts

Fig. 446.

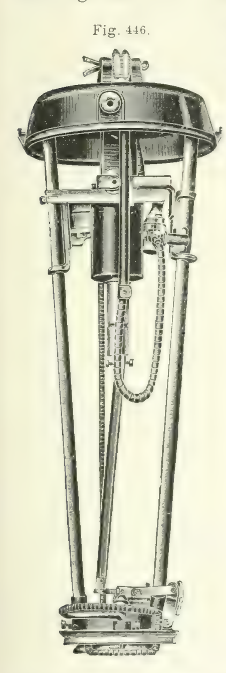
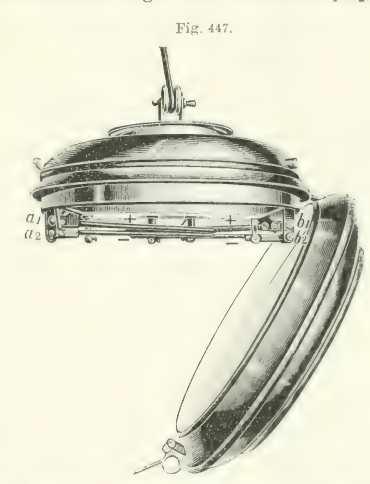


Fig. 447.



mit b_1 b_2 bezeichnet) drehbar sind. Im stromlosen Zustand ruht jede positive Kohle mit ihrer Spitze auf der negativen. Wird ein Strom durch die Kohlen gesendet, so geht er auch durch einen im Gehäuse der Lampe befindlichen Hauptstrommagneten, der seinen Anker anzieht und dadurch die positiven Kohlen hebt. Dadurch bildet sich der Lichtbogen zwischen je einer oberen und unteren Kohle. Daß dieser Lichtbogen bloß am Ende der Kohlenpaare brennt und nicht irgendwo auf der Länge der Kohlenstifte, hat seine Ursache in der magnetischen Wirkung des Stromes selbst auf den beweglichen Lichtbogen. Die Kraftlinien der Stromfläche, die von der linken positiven Kohle, dem Lichtbogen und der negativen Kohle gebildet wird, stehen senkrecht zu dieser Fläche und gehen nach hinten. Nach der Linken-Hand-Regel ist also der Zeigefinger bei Betrachtung der Figur nach hinten zu halten, der Mittelfinger in die

Richtung des Lichtbogens von oben nach unten, dann gibt der nach rechts zeigende Daumen an, daß der bewegliche Lichtbogen nach rechts, also an das Ende dieses Kohlenpaares getrieben wird. Entsprechend ist es bei dem anderen Paar Kohlen.

So hat das elektrische Bogenlicht sich für eine sehr große Zahl von Anwendungsgebieten durch konstruktive Durcharbeitung der Lampen und durch sorgfältige Herstellung der Kohlen geeignet machen lassen. Sowohl die gewöhnlichen Bogenlampen, die leicht von 500 bis 2000, wie die Flammenbogenlampen, die bis über 3000 Kerzenstärken ergeben, werden fast allen Zwecken, in denen eine glänzende und fast gefahrlose Beleuchtung erwünscht ist, gerecht. Die Bequemlichkeit, mit der man jede Lampe sofort durch Öffnen des Stromes von irgend einer Stelle aus verlöschen und wieder durch Schließen entzünden kann, erhöht ihre Anwendbarkeit. In Bezug auf Glanz und Weiße ähnelt das elektrische Bogenlicht am meisten dem Tageslicht, und die Effektkohlen erlauben, ihm nach Wunsch dem Auge angenehme Färbungen zu geben.

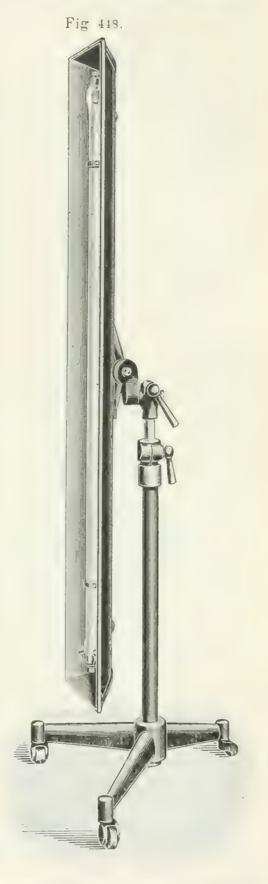
Sehr kleine Bogenlampen, die etwa 100 bis 300 Kerzenstärke geben, zu bauen, was eine Zeitlang von verschiedenen Fabriken geschah, ist jetzt nicht mehr am Platze, da durch die Metallfadenlampen, wie im nächsten Kapitel auseinandergesetzt wird, derselbe Zweck viel einfacher und fast ebenso ökonomisch erreicht wird. Dagegen kann man unter Umständen elektrische Lampen mit so großer Stromstärke betreiben, daß sie eine ganz ungeheure Lichtfülle aussenden. Man hat Lampen konstruiert, die Einzellichter bis zu einer Stärke von 50 000 bis 70 000 Normalkerzen erzeugen. Diese sehr starken Einzellichter sind selbstverständlich nur für besondere Zwecke anwendbar. Auf Leuchttürmen insbesondere werden sie seit langer Zeit angewendet. Die meisten großen Schiffe sind mit starkem elektrischen Bogenlicht versehen worden und mit Einrichtungen, durch welche dieses Licht nach beliebigen Richtungen hin reflektiert werden kann. Solche Marinereflektoren (Scheinwerfer) sind besonders von der Firma Schuckert mit vorzüglichen Leistungen ausgeführt worden.

Alle Bogenlampen, soweit sie bisher besprochen wurden, so verschieden sie auch in ihrer Konstruktion und in ihrem Anwendungsbereich waren, haben das eine Gemeinsame gehabt, daß bei ihnen der Lichtbogen zwischen Kohlen erzeugt wurde. Aber man kann, wie wir aus S. 118 wissen, auch zwischen Elektroden aus anderen, leicht zerstäubenden Substanzen einen Lichtbogen erhalten und insbesondere ist es das Quecksilber, welches leicht und bequem einen Lichtbogen bildet. Die Quecksilberbogenlampe von Arons, die wir früher erwähnt haben, war nun allerdings zunächst ein Apparat, der nur für wissenschaftliche Zwecke geeignet schien und als solcher auch gute Dienste geleistet hat. Bald aber erhielt dieselbe durch Cooper-Hewitt eine solche Form, daß sie auch für praktische Zwecke benutzbar war und nach seinem Vorgang werden jetzt von manchen Seiten solche Quecksilberbogenlampen konstruiert.

Bei diesen wird der Quecksilberlichtbogen in einem evakuierten Glasrohr erzeugt. Wenn dieses an seinen Enden 110 Volt Spannung haben soll, wenn also der Lichtbogen mit dieser Spannung brennen soll, so muß seine Länge eine erhebliche sein, 50 bis 100 cm. Man läßt, entgegen-

gesetzt der ursprünglichen Aronsschen Konstruktion, nur die eine Elektrode, die Kathode, aus Quecksilber bestehen, die Anode wird gewöhnlich aus Eisen oder Graphit hergestellt. Um den Lichtbogen zu entzünden, hat man verschiedene Mittel angewendet. Das einfachste, das auch am häufigsten benutzt wird, besteht in der Kippzündung. Man läßt das Quecksilber, während an die Lampe die Spannung angelegt ist, durch Neigung des Rohres von der positiven Elektrode zur negativen laufen, wodurch sich bei der Trennung der beiden Elektroden der Lichtbogen bildet, der nun, wenn das Quecksilber tief ist, die ganze Röhre erfüllt. Es muß so viel Quecksilber in der Röhre vorhanden sein, daß wenn man die Röhre langsam kippt, das Quecksilber eine leitende Verbindung von der Anode bis zur Kathode bildet. Natürlich wird man die Röhre passend so befestigen, daß ein solches Kippen bequem ausführbar ist. Fig. 448 zeigt eine Quecksilberbogenlampe von Boas, die sich in ihrem Gestell nach allen Seiten drehen und zum Zünden kippen läßt. In anderen Fällen befestigt man die Lampe drehbar an der Decke und bringt durch herabhängende Ketten das Kippen und Wiederaufrichten hervor.

Fig. 448.



Das Licht der Quecksilberlampe ist grünlichblau und für normale Zwecke der Beleuchtung zwar sehr hell, aber unangenehm, weil es die Gesichter fahl und blutlos erscheinen läßt. Wohl aber eignen sich diese Lampen in gewissen Fällen zur Schaufensterbeleuchtung. Nicht da, wo farbige Gegenstände ausgestellt werden, wohl aber da, wo Metallgegenstände, Spiegel, Juwelen etc. der Besichtigung unterstellt werden. Das so von dem Gewohnten abweichende Licht der Quecksilberlampe lenkt unwillkürlich die Aufmerksamkeit der Passanten auf sich und auf das beleuchtete Schaufenster.

Der Quecksilberlichtbogen in diesen Lampen bildet ganz dieselbe Erscheinung, wie die leuchtende Entladung in Geißlerröhren (oben S. 300). In Fig. 449 ist das Bild gezeichnet, welches der Quecksilber-

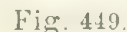


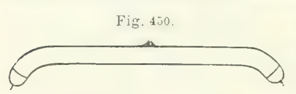
Fig. 449.

A K

lichtbogen im Vakuum bietet. An der Kathode K, an welcher das Quecksilber sich befindet, sieht man eine hell leuchtende Stelle, die in dem Quecksilber einen Trichter bildet, und die auf der Quecksilberoberfläche herumwandert. Von ihr aus geht ein Dampfstrahl fort, der aber zunächst unsichtbar ist. An diesen Stil schließt sich eine dunkle Stelle, der dunkle Kathodenraum an, an diesen die lange leuchtende Lichtsäule, die dem positiven Licht in Geißlerröhren entspricht. Zwischen ihr und der Anode ist dann wieder ein kleiner, dunkler Raum zu erkennen, und endlich ist die positive Elektrode mit einem schmalen leuchtenden Saum umgeben. Der Lichtbogen kann nur dann bestehen, wenn die Kathode so hohe Temperatur besitzt, daß sie reichlich negative Elektronen aussenden kann. Die Elektronen treffen nach Durchfliegung einer kurzen Strecke, des Dunkelraums, mit so großer Geschwindigkeit auf die Dampfmoleküle, daß sie diese durch Stoß ionisieren. Die so gebildeten positiven Bestandteile fliegen zur Kathode zurück und erhitzen sie durch ihren Anprall immer wieder, wodurch die hohe Temperatur an der Kathode bestehen bleibt, während die negativen Elektronen weiter fliegen und wieder neutrale Moleküle ionisieren. Die lange leuchtende Lichtsäule scheint aus solchen Molekülen zu bestehen, die durch negative Elektronen ionisiert werden, aber gleich wieder sich mit einem solchen Elektron verbinden (S. 313).

Ein Hauptvorzug des Quecksilberbogenlichts gegenüber dem gewöhnlichen Bogenlicht ist sein Reichtum an Strahlen von kurzer Wellenlänge, an den sogenannten ultravioletten Strahlen. Solche Strahlen haben eine sehr erhebliche photographische Wirkung und eine sehr ausgesprochene medizinische Wirkung auf Hautleiden. Wenn man aber den Quecksilberlichtbogen in einem Glasrohr erzeugt, wie bei der Cooper-Hewitt-Lampe, so kommt dieser Vorzug nicht zur Wirkung, weil das Glas die ultravioletten Strahlen größtenteils absorbiert (verschluckt). Man kann aber statt der Röhren aus gewöhnlichem Glas solche aus einem Spezialglas für derartige Lampen nehmen. Es war ein Fortschritt, als das Jenaer Glaswerk Schott u. Gen., welchem die Wissenschaft und Technik schon so viele wertvolle Neuerungen verdankt, ein Glas herstellte, welches anders als die gewöhnlichen Gläser gerade auch für die ultravioletten Strahlen fast vollständig durchlässig ist. Dieses Glas nannten sie Uviolglas und die damit konstruierte Quecksilberdampflampe Uviollampe. Die Form der Lampe ist in Fig. 450 gezeichnet. Ein Glasrohr von 40 bis 60 cm Länge enthält an seinen beiden Enden eingeschmolzene Platindrähte, welche im Innern der Röhre mit Kohlenspitzen verbunden sind. In der Röhre befindet sich über der Kathode Quecksilber. Die Montierung einer solchen Röhre an einem drehbaren Holzgestell zeigt Fig. 451, wobei man auch einen Vorschaltwiderstand V, einen Ausschalter A und ein Amperemeter M gleich an dem Gestell anbringen kann.

Fig. 450.

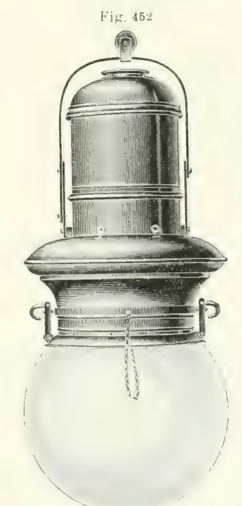


Die Benutzung dieser Lampen aus Uviolglas oder auch solcher aus Quarz, welcher ebenfalls für die ultravioletten Strahlen durchlässig ist, ist eine sehr ausgedehnte in photographischen Ateliers. Vermöge ihres

Reichtums an ultravioletten, photographisch wirksamen Strahlen eignen sie sich für Abendphotographieen weit mehr als die gewöhnlichen Bogenlampen. Die wichtigste Anwendung scheint aber der Quecksilberlampe und zwar speziell der aus Quarz oder Uviolglas gebildeten auf medizinischem Gebiet vorbehalten zu sein. Dort hat sie vermöge der in ihr enthaltenen ultravioletten Strahlen, wie vorliegende Versuche zu beweisen scheinen, dasselbe Feld zur Behandlung der Hautkrankheiten vor sich, das bisher der bekannten Finsenschen Behandlung allein zugänglich war, und da sie bedeutend bequemer anzuwenden ist, als die Finsenlampe, so verdrängt sie diese täglich mehr. So muß der Elektrizität zu ihren anderen großen Diensten, die sie der Menschheit bietet, auch jetzt noch das Verdienst des heilenden Arztes zugesprochen werden.

Fig. 451.

Fig. 452



Aber auch im Gebiet der eigentlichen Beleuchtung fängt die Quecksilberbogenlampe, und zwar als Quarzlampe an, den anderen Bogenlampen das Feld abzugraben und dies wegen ihrer außerordentlichen Ökonomie.

Die Quarzlampe, welche von der Quarzlampengesellschaft m. b. H. in Hanau eingeführt wird, hat, wie Fig. 452 zeigt, ganz das äußere Aussehen einer gewöhnlichen Bogenlampe. Im Innern der Glocke

ist die eigentliche Quecksilberlampe, welche, wie der Name besagt, in ein Quarzrohr eingeschlossen ist. Dieses Quarzrohr, den Brenner der Lampe, zeigt Fig. 453. Das eigentliche Rohr ist mit zwei quer angesetzten Gefäßen, ebenfalls aus Quarz, versehen, welche die Quecksilberelektroden enthalten. Diese Gefäße sind außen mit Fächern aus Metall umgeben, die als Kühler dienen, indem sie die Wärme von den Polgefäßen aufnehmen und ausstrahlen. Die Lampe ist dazu bestimmt, verhältnismäßig hohe Energiemengen aufzunehmen, was sie deswegen kann, weil Quarz viel höhere Temperaturen, ohne zu erweichen, aushält als Glas. Als Folge der hohen Temperatur in dem Rohr ergibt sich, daß der Dampfdruck des Quecksilbers ein hoher ist, die Lampe ist keine Vakuumlampe, wie die anderen Quecksilberbogenlampen, sondern es herrscht in dem Quarzrohr derselbe Druck wie außen. Bei diesem hohen Druck kann nun aber für gleiche Spannung das Rohr viel kürzer genommen werden als sonst, wodurch die Lampe eben ihre bequeme Form erhält, und weiter ist auch das Licht der Lampe nicht mehr so durchaus grünblau, wie das anderer Quecksilberlampen, sondern es nähert sich mehr dem gelblichweißen Licht. Der Lichtbogen erfüllt dabei nicht mehr den ganzen Querschnitt des Rohres, sondern schnürt sich auf einen Faden im Innern des Rohres zusammen. Um die Lampe zu entzünden, ist ein automatischer Kippmechanismus in dem Aufsatz der Lampe angebracht. Die Arbeitsweise desselben geht aus Fig. 454 hervor. Der Brenner a x ist durch die Zugstange v mit dem Anker r eines Nebenschlußmagneten q verbunden, während im Hauptstromkreis mit dem Brenner noch Vorschaltwiderstände h und m aus Eisendraht und eine Drosselspule l verbunden sind. Wird die Spannung angelegt, so zieht der Magnet q seinen Anker an und dreht den Brenner dadurch so, daß sein positives Ende a gehoben, sein negatives x gesenkt wird. Es läuft dadurch Quecksilber von a nach x und stellt die leitende Verbindung her. Dadurch wird die Drosselspule l magnetisch, zieht ihren Anker o an, der dadurch den Nebenschlußmagneten q stromlos macht, so daß der Brenner sich wieder senkt, das Quecksilber sich trennt und der Lichtbogen entsteht. Eine weitere Regulierung braucht

Fig. 453.

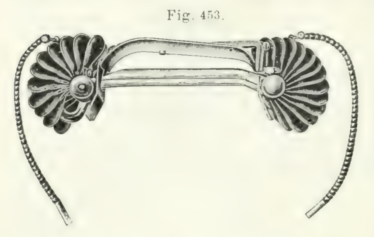
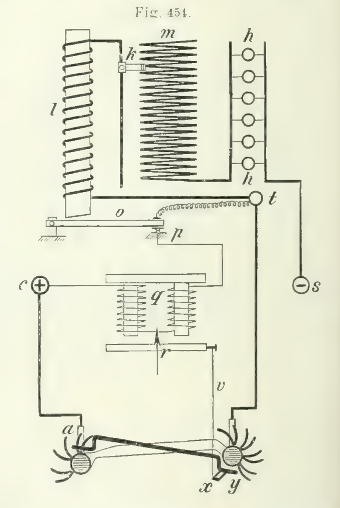
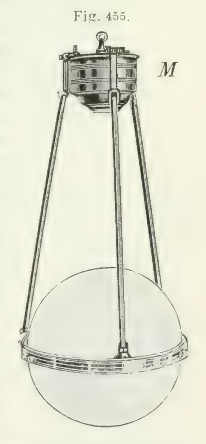


Fig. 454.



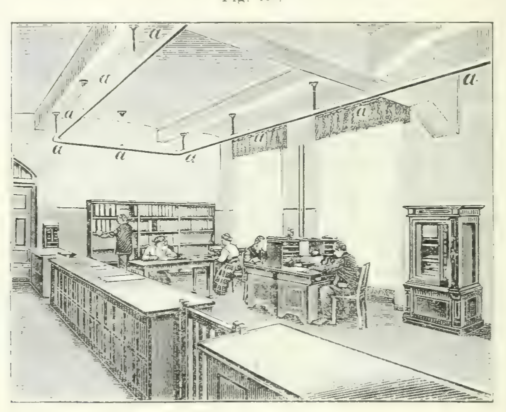
die Lampe im allgemeinen nicht. Die Vorschaltwiderstände h aus Eisendraht erlauben der Lampe gleich beim Anlegen der Spannung eine hohe Stromstärke zu geben. Durch diese kommt das Quecksilber rasch zum Sieden und der Dampf entwickelt sich in genügender Stärke. Die Eisendrähte werden aber zugleich durch den Strom auf Rotglut erhitzt und dadurch wächst ihr Widerstand auf das Vierfache, so daß damit zugleich die Stärke des die Lampe durchfließenden Stromes auf ihren normalen Wert sinkt. Die Helligkeit der Lampen ist infolge der hohen Temperatur eine sehr große. Lichtstärken von über 3000 Kerzen werden von Lampen erzeugt, die bei 220 Volt mit 3,5 Ampere brennen. Andere Lampen brauchen bei 220 Volt 2,5 resp. 1,5 Ampere und geben 1500 resp. 800 Kerzen, eine dritte Type, die für 110 Volt bestimmt ist, brennt mit 4 oder $2^1/_2$ Ampere und gibt 1200 oder 700 Kerzen. Die Ökonomie dieser Lampen ist infolge ihrer hohen Temperatur eine vorzügliche, sie brauchen pro Kerze nur ungefähr 0,25 Watt, übertreffen also die gewöhnlichen Bogenlampen erheblich und wetteifern mit den Flammenbogenlampen, vor denen sie den Vorzug haben, daß sie gar keine Bedienung brauchen. Wenn nun auch der Preis der Quarzlampen ein hoher ist, so ist doch der Betrieb derselben ein billiger, da für den Brenner 1000 Brennstunden garantiert werden. Jede Lampe kann für sich an ein Netz von 110 oder 220 Volt Spannung angeschlossen werden, während bei den gewöhnlichen Bogenlampen immer 2 bei 110 Volt brennen müssen. Das Licht ist durchaus ruhig und der Betrieb ein sehr bequemer, da diese Lampen nicht wie die anderen Bogenlampen tägliche Bedienung erfordern, sondern nur nach 1000 bis 10 000 Brennstunden im Durchschnitt eine Auswechslung des Brenners nötig ist. Da jedoch das Licht immerhin erheblich von dem Tageslicht abweicht, und eher dem Mondlicht an Farbe gleicht, so eignen sich die Lampen nicht für Theater, Restaurationen oder ähnliche Orte. Wohl aber haben sie große Vorzüge bei der Beleuchtung von Fabriken und überhaupt von Arbeitsräumen. Für diese Zwecke wird auch die Lampe (Quarzlampe Saturn) so eingerichtet, daß sie indirekte oder halb indirekte Beleuchtung gibt, d. h. daß sie ihr Licht ganz oder zum Teil an die weiße Decke des zu beleuchtenden Raumes wirft, so daß das von der Decke diffus reflektierte Licht die eigentliche Helligkeit an den Arbeitsplätzen erzeugt. Eine Abbildung einer solchen Lampe mit automatischer Zündung für niedrige Räume zeigt Fig. 455. Der Brenner ist von einer aus zwei Halbkugeln bestehenden Glocke umgeben, welche selbst frei hängt, während der Elektromagnet M oben besonders angebracht ist. Die untere Halbkugel besteht aus Milchglas, durch welches das nach unten geworfene Licht diffus zerstreut wird, während die obere Kugel aus Klarglas besteht und dadurch den größten Teil des Lichtes an die Decke gehen läßt, wo es diffus reflektiert wird. Durch ihre verschiedenen Vorzüge erobert sich die Quarzlampe täglich neues Terrain.

Fig. 455.



Eine ganz eigenartige Beleuchtung, die nach sehr langer probeweiser Entwicklung jetzt zu praktischer Einführung gelangt ist, bietet das sogenannte Moorelicht. Diese Beleuchtung benutzt das Licht von Geißlerröhren, also von leuchtenden Gasen (S. 300). Die Schönheit und Brillanz der leuchtenden Geißlerröhren fällt jedem auf, aber daß dieses Licht zu einer praktischen Beleuchtung angewendet werden könne, schien doch stets ein utopischer Gedanke. Erst der Amerikaner Mac Farlan Moore gelangte durch vieljährige Versuche und durch einige wichtige neue Anordnungen dazu, dieses Licht in bequemer und zweckmäßiger und origineller Weise der Praxis zugänglich zu machen. Ein Raum, der mit Moorelicht beleuchtet wird, hat ein eigentümliches Aussehen, da er gar keine eigentlichen Lampen enthält. Vielmehr läuft ein System von Glasröhren an der Decke oder den Wänden entlang, und dieses ganze lange

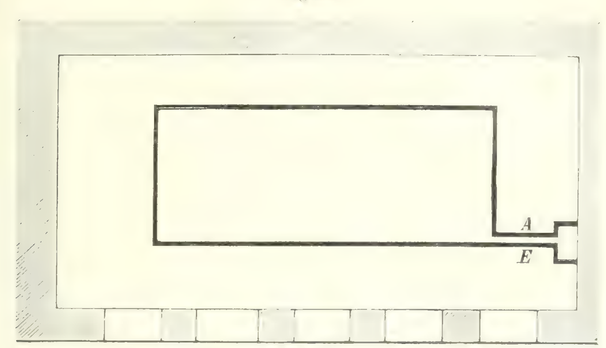
Fig. 456.



Rohr leuchtet überall und erleuchtet dadurch den Raum. In Fig. 456 ist ein Bureau gezeichnet, an dessen Decke ein solches langes, zusammenhängendes, mehrfach rechteckig umgebogenes leuchtendes Rohr a a a . . ., durch Träger befestigt, zu sehen ist. Diese Röhren können 20 bis 160 m Länge haben und werden an Ort und Stelle aus 2 m langen Röhren zusammengeschweißt und evakuiert. Ihr äußerer Durchmesser ist 44 mm. Das ganze System enthält das Geißlerlicht, das durch Wechselstrom von genügender Spannung erzeugt wird. Gewöhnlicher Wechselstrom von 110 oder 220 Volt Spannung wird durch einen Transformator auf 5000 bis 6000 Volt Spannung gebracht und dieser hochgespannte Strom wird durch das Rohrsystem gesendet, welches dabei aber selbst ganz gefahrlos anzufassen ist. Die Hauptschwierigkeit bei dieser Beleuchtung bestand darin, daß ein solches Geißlerrohr, wenn dauernd Strom durch dasselbe geht, von selbst sich immer mehr evakuiert, härter wird, indem die Gasteilchen von den Glaswänden absorbiert werden; mit dem Härterwerden ist eine Erhöhung der notwendigen Spannung verbunden und bei gleichbleibender Span-

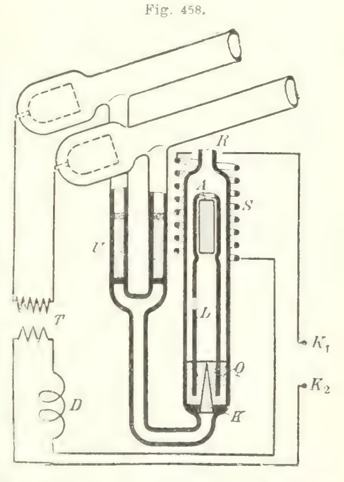
nung wird das Licht zuerst immer unruhiger, flackert und verlischt schließlich. Das wesentliche Erfordernis war daher, das Vakuum in diesen Röhren immer auf der gleichen Höhe zu erhalten, damit das

Fig. 457.



Licht dauernd in gleicher Weise erzeugt wird. Das gelang nun Moore durch ein sehr sinnreiches Ventil zu erreichen, welches die ganze Einrichtung erst praktisch brauchbar gemacht hat. Die Röhren werden durch den Raum so geführt, daß Anfang und Ende derselben, die mit Graphitelektroden versehen sind, nahe beieinander sich befinden. Fig. 457 zeigt z. B. eine solche einfache Leitungsführung, in der A und E die Enden des Rohrsystems sind. Diese Enden der ganzen Röhre sind nun in Fig. 458 gezeichnet in ihrer Verbindung mit dem Ventil und mit dem Transformator. Der primäre Wechselstrom (von etwa 110 Volt Spannung) tritt bei K_1 und K_2 ein, durchfließt ein zu dem Ventil gehöriges Solenoid S und eine Drosselspule D und die primäre Wicklung des Transformators T. Die sekundäre Wicklung desselben ist mit den Elektroden des Rohres verbunden. Das Ventil hat nun die Aufgabe, wenn die Luft in dem Rohre zu sehr verdünnt ist, etwas neue Luft aus der Atmosphäre in dasselbe einzuführen. Das Ventil besteht aus einem Glasrohr, das bei R offen

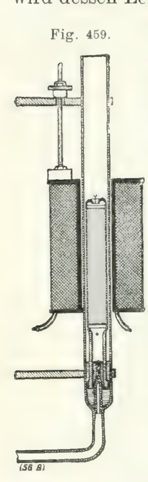
Fig. 458.



ist und das oben mit dem Solenoid umgeben ist. In diesem Rohr ist innen ein anderes, bewegliches Glasrohr, das bei Q in Quecksilber

taucht, bei L eine Öffnung hat und bei A einen aus Eisendrähten gebildeten Eisenkern besitzt. Das Quecksilber bei Q bedeckt in der Figur gerade noch die Spitze eines Kegels K einer sehr dichten Kohle. Nimmt nun die Leitungsfähigkeit des Gases in dem Rohrsystem ab, so wird der primäre Wechselstrom stärker (da von der sekundären Rolle bei T dann eine geringere Rückwirkung auf die primäre ausgeübt wird). Infolge des stärkeren primären Stromes zieht die Magnetisierungsspule S den Eisenkern A mit seinem Glasrohr etwas in die Höhe, dadurch sinkt das Quecksilber bei Q, die Spitze des Kohlenkegels wird frei und durch die Poren der Kohle dringt etwas Luft von außen in das evakuierte Rohr. Dadurch wird dessen Leitungsfähigkeit verbessert und das Glasrohr A L senkt sich wieder, die Kohle wird wieder mit Quecksilber bedeckt. Dieses Spiel wiederholt sich in ziemlich kurzer Zeit, etwa alle Minuten und bewirkt das Eintreten von minimalen Quantitäten Luft. Damit die beiden Röhren U, welche mit dem Anfang und Ende des Rohrsystems verbunden sind, nicht einen Kurzschluß bilden, so daß die Entladung durch U geht, statt durch die lange Röhre, ist bei U Sand eingefüllt, der durch Pfropfen gehalten wird und der zwar der Luft den Durchgang gestattet, nicht aber der Entladung wegen des großen Widerstandes. Der Querschnitt dieses geistreichen Vakuumregulators ist in Fig. 459 gezeichnet. Die Füllung der Röhren geschieht aber nicht mit Luft, sondern entweder mit Stickstoff, welcher eine gelbrosa Farbe hat, oder mit Kohlensäure, welche rein weißes Licht liefert. Der Stickstoff wird aus der Luft selbsttätig entnommen, indem die eintretende Luft über Phosphor streicht, welcher den Sauerstoff fortnimmt. Um Kohlensäure nachzufüllen, ist in der Röhre ein Behälter mit Marmor und Salzsäure angeordnet, durch welche sich Kohlensäure entwickelt. Bei dem minimalen Bedarf an nachzufüllenden Gasen reicht eine Beschickung mit Phosphor resp. mit den Materialien für die Kohlensäureentwicklung für mehrere Jahre.

Fig. 459.



Diese eigenartige und interessante Beleuchtung (ausgeführt von der Moorelicht A. G. Berlin), welche ihrer Neuheit wegen und durch ihr angenehmes Licht überall erfreulich auffällt, ist auch vom ökonomischen Standpunkt aus durchaus mit den anderen Beleuchtungsarten durch Bogenlampen und Glühlampen vergleichbar. Sie erfordert pro erzeugte Hefnerkerze etwa 1 Watt Stromenergie, ungefähr dasselbe, was die Metallfadenlampen brauchen, sie gibt aber infolge ihrer Anordnung ein viel diffuseres, der Tagesbeleuchtung ähnliches Licht.

6. Kapitel.

Das elektrische Glühlicht und die elektrischen Koch- und Heizapparate.

Während das elektrische Bogenlicht seine unleugbaren Vorzüge bei der glänzenden Beleuchtung von Straßen, Plätzen, großen Sälen und ausgedehnten Räumen besitzt, ist es nicht anwendbar für die Beleuchtung von Häusern und Zimmern, in denen gewöhnlich nicht sehr starke Lichtquellen verlangt werden, sondern im Gegenteil Lichtquellen von mäßiger Stärke, aber in sehr weitgehender Verteilung und mit allen den Bequemlichkeiten im Privatgebrauch, wie sie das Gaslicht längst besitzt.

Hier war es notwendig, ein anderes Prinzip technisch anzuwenden, und dieses angewendet und mit Energie praktisch durchgearbeitet zu haben, ist das ungeschmälerte Verdienst von Edison, dessen unermüdliche Bemühungen den durchschlagenden und bleibenden Erfolg hatten, auf elektrischem Wege ein Licht zu schaffen, welches eine Teilung fast bis ins Unendliche gestattet, welches beliebig kleine Lichtstärken an beliebig vielen Punkten hervorzubringen erlaubt.

Das elektrische Glühlicht beruht darauf, daß ein von einem Strom durchflossener Leiter nach dem Jouleschen Gesetz erhitzt und zum Leuchten gebracht wird. Wenn ein elektrischer Strom durch einen Leiter fließt, so wächst die in ihm erzeugte Wärmemenge mit dem Quadrat der Stärke des durchgehenden Stromes und mit dem Widerstand des Leiters. Ist die entwickelte Wärmemenge groß genug, so kommt der Leiter in helles Glühen, und wenn er schmelzbar ist, so wird er durch den elektrischen Strom geschmolzen. Diese Tatsachen waren lange bekannt und schon lange hatte man versucht, dünne Metalldrähte, insbesondere Platindrähte, die zum Glühen gebracht waren, zur Beleuchtung zu verwenden. Indes war bei Metallen eben die Gefahr des Schmelzens eine sehr große. Wurde der Strom zu stark, so wurde der glühende Platindraht weggeschmolzen und die Beleuchtung hörte auf. Es bot sich daher als bestes Material für solche Glühlichter zunächst die Kohle dar, welche bekanntlich noch auf keine Weise, durch keine noch so hoch gesteigerte Temperatur zum Schmelzen gebracht werden konnte. Und in der Tat wendete sich Edison, nachdem er eine Reihe der am schwersten schmelzbaren Metalle erfolglos probiert hatte, der Kohle zu, um sie elektrisch glühend zu machen und dadurch zur Beleuchtung zu verwenden.

Aber glühende Kohle verbindet sich mit dem Sauerstoff der Luft, sie verbrennt rasch, und es ist deshalb eine notwendige Forderung, sorgfältig den Sauerstoff der Luft von ihr abzuhalten. Man muß also die Kohle in einen luftleeren Raum einschließen, und das erreicht man, indem man sie in Glasgefäße bringt, aus denen alle Luft sorgfältig aus-

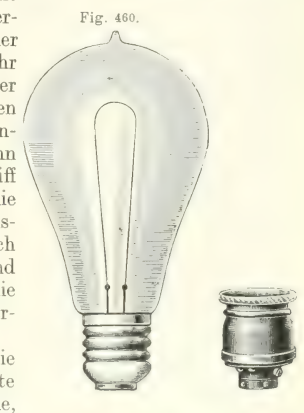
gepumpt ist. Eine möglichst vollkommene Evakuation der Luft aus Glasgefäßen ist aber nur dann zu erreichen, wenn das Glasgefäß ganz ohne Kitt verschlossen ist, wenn also der Verschluß nur durch Zuschmelzen des Glases hergestellt ist. Es muß also die Kohle auf irgend eine Weise durch Einschmelzen in dem Glasgefäß befestigt sein. Das läßt sich nun zum Glück leicht machen, wenn man die Enden des Kohlendrahtes an Platindrähten befestigt. Platin läßt sich nämlich leicht und dauerhaft in Glas einschmelzen, weil beide denselben Ausdehnungskoeffizienten haben. Bei der Vorzüglichkeit der neuen Quecksilberluftpumpen oder der Ventilluftpumpen mit Maschinenbetrieb ist es dann nicht schwer, Glasgefäße fast vollkommen luftleer zu machen.

Zur Herstellung der dünnen Kohlenfäden, die man ursprünglich durch Verkohlung von Pflanzenfasern erhielt, benutzt man jetzt reine, künstlich hergestellte Zellulose, welche vollständig strukturlos ist. Die Zellulose wird durch eine Düse hindurchgepreßt und liefert dadurch einen endlosen, dünnen Faden, der in kleine Fäden zerschnitten und in die Form von Hufeisen oder Schleifen gebracht wird. Diese Fäden werden darauf „karbonisiert", verkohlt, indem man sie in einen passend eingerichteten Ofen bringt. Diese Herstellungsweise liefert ein sehr festes und doch dehnbares Material. Außerdem werden die so hergestellten Kohlenfäden gewöhnlich noch präpariert. Man umgibt nämlich einen solchen Kohlenfaden noch mit einer Schicht von strukturloser Kohle. Dieses letztere erreicht man dadurch, daß man den dünnen Kohlenfaden, die Seele, in Leuchtgas oder einen anderen Kohlenwasserstoff bringt und durch einen elektrischen Strom glühend macht. Dann scheidet sich aus dem Leuchtgas die Kohle in sehr dichtem Zustand auf der Seele ab und der Kohlenfaden erhält überall gleichmäßige Stärke. Man kann nun den Kohlenniederschlag so regulieren, daß der Faden einen gewünschten Widerstand bekommt, und dadurch eine beliebige Menge von Lampen mit gleichem Widerstand herstellen. Die Kohlenfäden werden bei den Lampen entweder einfach hufeisenförmig gebogen, oder sie enthalten mehrfache Windungen oder Schlingen.

Die Enden des Kohlenfadens werden an Platindrähten befestigt, welche in Glas eingeschmolzen sind und aus dem evakuierten luftleeren Gefäß herausführen. Diese Verbindung der Kohle mit dem Platin wird gewöhnlich durch Verkupferung oder auch durch einen Kohlenniederschlag bewirkt. Die Platindrähte führen dann zu zwei voneinander isolierten Metallstücken außen am Lampenkörper, die man speziell Kontakte nennt. Jede Lampe wird nun beim Gebrauch in eine Fassung eingesetzt, die an Wandarmen, Kronleuchtern, Lampenständern u. dgl. befestigt ist und zu welcher die beiden Leitungsdrähte, die den Strom in die Lampe schicken sollen, hingeführt sind. Die Fassung enthält also ebenfalls zwei isolierte metallische Teile, mit welchen die äußeren Leitungsdrähte verbunden sind. Sobald die Lampe in ihre Fassung fest eingesetzt ist, geht der Strom durch den Kohlenfaden. In Bezug auf die Fassung der Lampen und die Kontakte des Lampenkörpers bestehen verschiedene Einrichtungen. Bei allen kommt es darauf an, daß der Kontakt ein durchaus sicherer sei. Selbstverständlich muß die Fassung immer zu den Kontakten passen. Die weitaus gebräuchlichste Fassung ist die Edison-

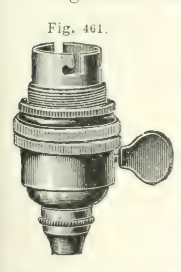
fassung (Fig. 460). Bei dieser ist an den Lampenkörper unten ein metallisches Schraubengewinde (das Edisongewinde) angekittet, mit welchem der eine Platindraht verbunden ist. Der andere geht an ein isoliertes Metallstück am Boden. Die Lampe wird in ihre Fassung eingeschraubt. Die Fassung enthält nämlich die zugehörige Schraubenmutter, und in diese führt der eine Draht der Zuleitung. Am Boden der Fassung befindet sich isoliert eine Metallfeder, mit welcher der zweite Zuleitungsdraht verbunden ist. Beim Einschrauben der Lampe in den Träger drückt sich ihr Metallplättchen am Boden auf die Feder auf und bewirkt so einen vorzüglichen Kontakt, so daß der Strom sicher hindurchgehen kann. In die Fassungen kann man auch, wenn man es will, einen Griff (Hahn) anbringen, durch den man die Lampe nach Belieben anzünden oder auslöschen kann. Der Hahn dreht nämlich ein Porzellanrädchen, welches leitende und isolierende Sektoren besitzt und dadurch die Leitungsverbindung herstellt oder unterbricht.

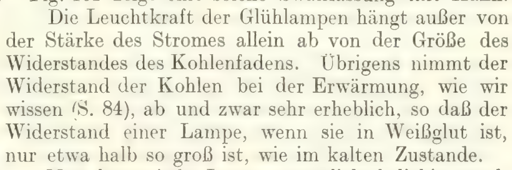
Fig. 460.



Bei der Swanfassung werden die Enden der eingeschmolzenen Platindrähte in zwei am Boden der Lampe befindliche, voneinander isolierte Messingplatten geführt und die ganze Lampe in die Fassung eingesetzt, so daß durch sogenannten Bajonettverschluß Kontakt hervorgebracht ist. Fig. 461 zeigt eine solche Swanfassung mit Hahn.

Fig. 461.





Die Leuchtkraft der Glühlampen hängt außer von der Stärke des Stromes allein ab von der Größe des Widerstandes des Kohlenfadens. Übrigens nimmt der Widerstand der Kohlen bei der Erwärmung, wie wir wissen (S. 84), ab und zwar sehr erheblich, so daß der Widerstand einer Lampe, wenn sie in Weißglut ist, nur etwa halb so groß ist, wie im kalten Zustande.

Man kann jede Lampe natürlich beliebig stark leuchten lassen, wenn man Ströme von verschiedener Stärke durch sie hindurchsendet. Aber der elektrische Strom übt eine zerstörende Wirkung auf die Kohlenfäden aus, indem er sie nämlich allmählich zerstäubt. Je stärker der durch die Kohle fließende Strom ist, um so stärker ist diese Zerstäubung und um so leichter wird die Lampe ruiniert, indem schließlich an einer Stelle, an welcher der Kohlenfaden am dünnsten geworden ist, ein Bruch stattfindet. Daher schadet ein zu starker Strom jeder Lampe, und es gibt für jede Lampe eine bestimmte Stromstärke, bei welcher sie einerseits nicht zu sehr in Anspruch genommen wird, andererseits eine passende Helligkeit hat. Man gibt aber gewöhnlich nicht an, mit welcher Stromstärke eine Lampe normal brennt, sondern man gibt an, wie groß die Spannungsdifferenz an ihren

Enden sein soll, damit sie normal brenne. Da nämlich der Widerstand der Lampe durch ihre Verfertigung gegeben und bekannt ist, so folgt aus dieser normalen Spannung ohne weiteres auch die normale Stromstärke.

So hat z. B. eine bestimmte Lampe einen Widerstand von 245 Ohm, wenn sie heiß ist. Falls durch diese Lampe ein Strom von 0,45 Ampere hindurchgeht, so brennt sie gerade normal und hat dann eine Leuchtkraft von 16 Kerzen Stärke. Die Spannung an den Enden eines Leiters ist nun, wie wir wissen, stets gleich der Stromstärke, die ihn durchfließt, multipliziert mit seinem Widerstand. Daher kann man leicht ausrechnen, daß an den Enden dieser Lampe eine Spannung von $245 \times 0{,}45 = 110$ Volt herrschen muß. Man sagt daher, daß die betreffende Lampe eine 16-Kerzenlampe für 110 Volt sei, d. h. daß sie bei dieser Spannung einerseits gerade normal mit 16 Kerzen Lichtstärke brennt, andererseits auch genügend lange Zeit aushält. Bringt man diese Lampe zwischen zwei Leitungen von kleinerer Spannungsdifferenz, so ist auch der durchfließende Strom schwächer und die Lampe brennt mit zu geringer Helligkeit. Bringt man sie in eine Leitung von größerer Spannung, so wird der Strom stärker, der durch sie hindurchfließt, dadurch wird auch die Helligkeit größer, aber nur auf Kosten der Lebensdauer der Lampe. Im Durchschnitt brennt jede Glühlampe, wenn sie nie einen stärkeren Strom als den für sie normalen bekommt, 600—800 Stunden. So hat es sich eingebürgert, die Glühlampen einfach nach der Zahl der Volt zu charakterisieren, die sie zum normalen Brennen brauchen. Man spricht von einer Lampe für 4 Volt, 10, 25, 110 etc. Volt. Eine jede solche Lampe hat nun eine bestimmte normale Helligkeit, und zwar gibt es Glühlampen in allen Größen, deren Lichtstärke von einer einzigen Normalkerze bis zu mehreren Hunderten variiert. Für die Beleuchtung in Zimmern ist die passendste Helligkeit bei dem Lichtbedürfnis, wie es sich jetzt eingebürgert hat, die von 25 Kerzen, während man sich früher schon mit 16 Kerzen begnügte, und daher haben auch die am meisten gebrauchten Glühlampen diese Lichtstärke. Für bessere Beleuchtung nimmt man Lampen von 32 oder auch 50 Kerzen. Lampen von geringerer Helligkeit, bis zu einer Normalkerze, werden nur für spezielle Zwecke, etwa als Nachtlampen, für Dekorationszwecke oder dergleichen benutzt, während Lampen von größerer Helligkeit, bis zu 100 oder 200 Normalkerzen, hauptsächlich zur Beleuchtung in Straßenlaternen dienen.

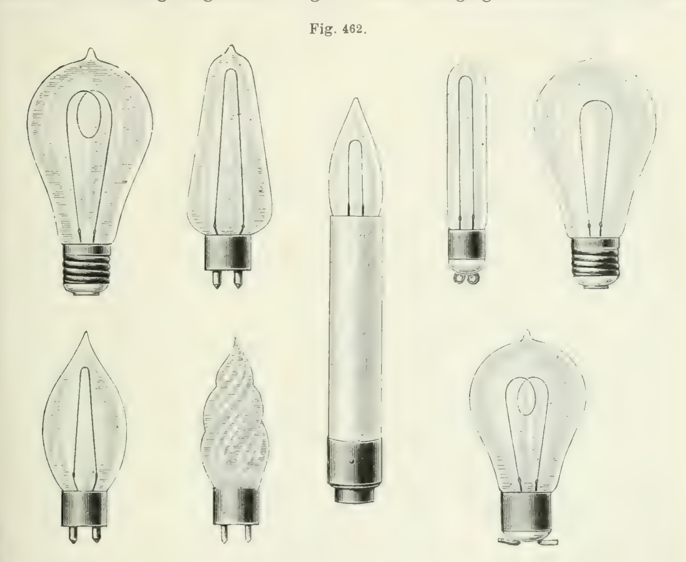
Da an den Enden einer jeden Lampe eine bestimmte Spannung in Volt herrscht und da die Lampe von einem Strom mit einer bestimmten Zahl Ampere durchflossen wird, so enthält jede brennende Lampe einen gewissen Effekt, d. h. es wird in jeder Sekunde eine gewisse Arbeitsmenge verbraucht, um eben die Lampe zum Leuchten zu bringen. Der Effekt in der Lampe (in Watt ausgedrückt) ist gleich dem Produkt der Volt und der Ampere (s. S. 115). Also z. B. unsere eben erwähnte Lampe, die bei 110 Volt Spannung 0,45 Ampere Stromstärke braucht, um normal zu brennen, hat dabei einen Effekt von 49,5 Watt. Da nun 736 Watt = 1 Pferdekraft sind, so verbraucht die Lampe beim normalen Brennen $\frac{49{,}5}{736}$ = etwa $\frac{1}{15}$ PS. Es können also durch eine Pferdekraft etwa 15 solcher Lampen betrieben werden. Da die Lampe bei rund 50 Watt Ver-

brauch eine Lichtstärke von 16 Normalkerzen gibt, so kommt auf jede Kerze ein Verbrauch von $\frac{50}{16} = 3{,}2$ Watt. Im allgemeinen brauchen alle Glühlampen stets etwa 2,5 bis 3,5 Watt für eine Normalkerze Helligkeit.

Solche Glühlampen werden von einer Reihe von Glühlampenfabriken im großen fabriziert und zwar für Lichtstärken von $^1/_4$ Normalkerze bis zu 400 und für alle gebräuchlichen Spannungen. Die Form der Kohlenfäden ist beliebig. Sie bilden bald ein einfaches Hufeisen, bald bilden sie eine oder mehrere Schleifen.

Die Glasgefäße der Glühlampen werden durchsichtig oder matt, farblos oder farbig hergestellt. Fig. 462 stellt einige gebräuchliche Formen

Fig. 462.

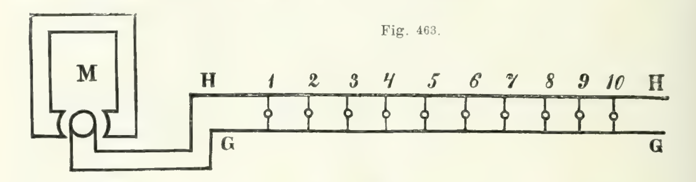


von Glühlampen zu gewöhnlichen und zu dekorativen Zwecken dar. Die Kontakte derselben bestehen zum Teil aus den beschriebenen Platten oder Gewinden, zum Teil aber auch aus Stäben oder Ösen.

Die Glühlampen besitzen im allgemeinen einen sehr hohen Widerstand, der über 200 Ohm geht, und brauchen daher auch eine große Spannung an ihren Enden, aber sie brauchen nur verhältnismäßig schwache Ströme. Für eine 16kerzige Glühlampe von 110 Volt Spannung braucht man einen Strom von etwa nur $^1/_2$ Ampere. Um nun eine ganze Anzahl Glühlampen von einer und derselben Quelle (Dynamomaschine oder Akkumulatoren) betreiben zu lassen, so daß sie unabhängig voneinander sind, hat Edison zuerst die einfachste Schaltung angegeben, nämlich die Parallelschaltung. Diese ist jetzt ganz allgemein als die zweckmäßigste Art der Schaltung von elektrischen Apparaten anerkannt und benutzt. Die

Lampen werden also alle n e b e n e i n a n d e r geschaltet, d. h. so, wie es in Fig. 463 gezeichnet ist, in welcher M die Stromquelle (Maschine) und 1, 2, 3 bis 10 die Lampen sind. Es gehen von der Stromquelle dabei zwei Leitungen H H und G G aus und zwischen diese werden die einzelnen Lampen geschaltet. An den Enden einer jeden Lampe muß eine solche

Fig. 463.



Spannung herrschen, daß sie in dem Widerstand der Lampe gerade den normalen Strom hervorbringt.

Wenn nun die Hauptleitungen H H und G G so dick gemacht werden, daß ihr Widerstand vernachlässigt werden kann, also auch der Spannungsverlust auf ihnen so klein ist, daß er nicht in Frage kommt, dann herrscht an den Enden jeder Lampe dieselbe Spannung, nämlich die Spannung zwischen den Punkten H und G. Damit nun alle Lampen immer mit gleicher Helligkeit brennen, ist nur nötig, daß die Spannung zwischen H und G immer konstant gehalten wird, daß diese immer dieselbe bleibt, daß also die Spannung an den Klemmen der Maschine (die K l e m m e n s p a n n u n g) immer denselben Wert hat.

Um daher eine Glühlichtbeleuchtung brauchbar herzustellen, kann man alle diejenigen Stromerzeuger benutzen, welche entweder von selbst konstante Klemmenspannung besitzen, oder bei denen sie sich leicht herstellen läßt. Die vorteilhaftesten Stromerzeuger sind daher die A k k u m u l a t o r e n. Denn diese liefern immer konstante Spannung, welche nur ganz allmählich abnimmt und durch Zellenschalter noch reguliert werden kann. Sie sind namentlich für Privathäuser am meisten angebracht, in denen eine fachmännische Bedienung für die Anlage gewöhnlich fehlt. Für große ausgedehnte Zentralstationen aber werden zur Erzielung konstanter Spannung immer N e b e n s c h l u ß d y n a m o s benutzt, denn bei diesen kann man ja, wie wir S. 403 gesehen haben, durch Regulierung des Nebenschlusses die Klemmenspannung absolut konstant erhalten.

Ist in solcher Weise von der Maschine oder von den Akkumulatoren aus für stets gleichbleibende Spannung gesorgt, so kann man eine jede Lampe oder ganze Lampengruppen beliebig auslöschen oder anzünden, ohne die anderen zu stören.

Dem elektrischen Glühlicht ist eine Zeitlang durch die Erfindung des Auerschen Gaslichtes ein starker Abbruch geschehen. Das Auerlicht ist nicht nur bedeutend heller, sondern auch bedeutend billiger als das Glühlicht von Kohlenfadenlampen. Diese Konkurrenz des Gaslichtes hat aber die Elektrotechnik angespornt, auch ihrerseits das Glühlicht so zu verbessern, daß es dem verbesserten Gaslicht gegenüber auch wieder Vorteile gewinnt. Um zu Glühlampen zu gelangen, die ökonomischer brennen als die gewöhnlichen, also für dieselbe Lichtstärke weniger Watt

brauchen, war es notwendig, den Glühfaden auf höhere Temperatur zu bringen, als sie die Kohlenfadenlampen, ohne rasch zerstört zu werden, aushalten können. Die gesamte, von einem strahlenden Körper ausgesendete Energie (welche nur zum Teil in Form von Licht, zum größten Teil in Form von Wärme ausgestrahlt wird) wächst erheblich mit wachsender Temperatur, nämlich nach dem berühmten, von Stefan aufgestellten Gesetz, mit der vierten Potenz der Temperatur, wenn diese von — 273° C an gerechnet wird, der sogenannten absoluten Temperatur. In dieser Gesamtstrahlung ist aber sowohl die Lichtstrahlung als die Wärmestrahlung enthalten, welch letztere für die Beleuchtung unwesentlich ist. Wenn aber die Temperatur eines glühenden und strahlenden Körpers erhöht wird, so tritt zugleich auch eine Änderung im Charakter der Strahlung ein, indem nämlich das Maximum der ausgestrahlten Energie bei wachsender Temperatur immer mehr in das Gebiet der Lichtstrahlen, statt der dunklen Wärmestrahlen fällt, und zwar immer mehr in das Gebiet des gelben Lichts rückt, für welches unser Auge am empfindlichsten ist. Daraus folgt, daß die von einem strahlenden Körper ausgesandte Lichtmenge weit stärker mit wachsender Temperatur steigt, als die ausgesandte Gesamtstrahlung, so daß bei gleicher Gesamtstrahlung die Lichtstrahlung um so größer wird, je höher die Temperatur des strahlenden Körpers ist. Man kann das auch umgekehrt so ausdrücken, daß bei gleicher Lichtstärke die Gesamtstrahlung um so kleiner ist, je höher die Temperatur ist. Die Gesamtstrahlung eines strahlenden Glühfadens wird aber durch die gesamte, auf ihn übertragene elektrische Energie, also durch die Zahl der Watt hervorgebracht. Und man erkennt daher, daß eine Glühlichtbeleuchtung um so vorteilhafter, um so ökonomischer werden muß, d. h. daß pro HK um so weniger Watt aufgewendet werden müssen, je höher die Temperatur des Glühfadens ist. Prinzipiell stand ja bei Kohlenfäden nichts im Wege, sie auf höhere Temperatur zu bringen, d. h. etwa sie bei gleichem Widerstand mit höherer Stromstärke zu betreiben, also z. B. eine Lampe für 110 Volt in einem Netz von 220 Volt Spannung brennen zu lassen. Man erhält dadurch auch sofort eine enorme Steigerung der ausgestrahlten Lichtstärke. Aber damit geht zugleich Hand in Hand eine erhebliche Steigerung der Zerstäubung des Kohlenfadens, so daß die Lebensdauer desselben eine ungleich kürzere wird. Man stellt Glühlampen mit Kohlenfäden zwischen 3,5 und 2,5 Watt Effektverbrauch (pro Kerze) dar. Die letzteren haben nach dem Gesagten im allgemeinen eine erheblich geringere Lebensdauer als die ersteren, weil sie höhere Temperatur besitzen, also mehr zerstäuben.

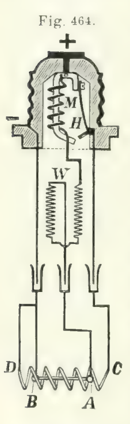
Es handelte sich also darum, Glühfäden herzustellen, welche eine höhere Temperatur aushalten können, als die Kohlenfäden, ohne durch Zerstäuben oder Schmelzen ruiniert zu werden. Die Temperatur der Kohlenfäden gewöhnlicher Glühlampen liegt zwischen 1600 und 1700° C. Man mußte also Fäden herstellen, welche ohne Schaden Temperaturen von mehr als 1700° aushalten konnten. Diese Absicht zu erreichen, ist man auf zwei verschiedenen Wegen vorgegangen.

Der eine Gedanke bestand darin, auch das elektrische Glühlicht gerade so zu verbessern, wie Auer das Gaslicht verbessert hatte, indem man statt der glühenden Kohle die weißglühenden Erden, mit denen

die Glühstrümpfe imprägniert sind, auch bei der Elektrizität als Leuchtkörper benutzt. Diese Stoffe sind feuerbeständig und können eine viel höhere Temperatur als die Kohle annehmen und dadurch ein intensives und ökonomisches Licht ausstrahlen. Aber zum Unglück sind diese Substanzen, wie z. B. Magnesiumoxyd, in kaltem Zustand elektrische Nichtleiter. Erst bei sehr hohen Temperaturen, bei Rotglut, werden sie gute Leiter der Elektrizität und zwar namentlich dann, wenn man nicht eine einzige reine Substanz, sondern ein Gemisch mehrerer derartiger Substanzen anwendet. Aber gerade die hohe Temperatur, bei der sie erst leitend werden, macht ihre direkte Anwendung zu Beleuchtungszwecken schwierig, da ein Stäbchen aus solcher Substanz nicht von selbst durch den Strom glühend wird, weil es eben zunächst keinen Strom durchläßt, sondern erst vorher erwärmt werden muß, um überhaupt zu leiten.

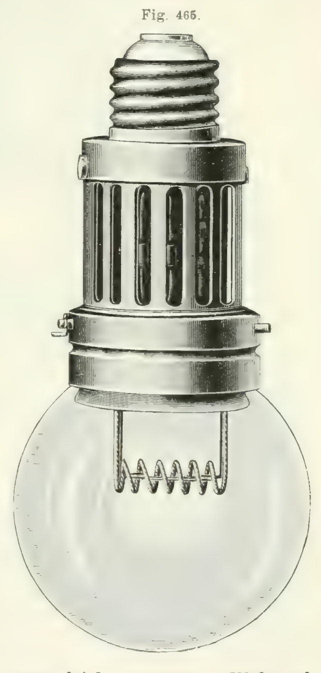
Diese und andere technische Schwierigkeiten so zu überwinden, daß eine brauchbare und bequeme Glühlampe mit derartigen Körpern hergestellt werden konnte, war keine leichte Aufgabe und erforderte jahrelange Arbeit seitens des Erfinders dieser Lampen, Professor Nernst in Verbindung mit der A.E.G. Die Nernstlampe enthält ein Stäbchen aus Magnesia mit Beimengungen anderer Erden. Wenn man ein solches erst vorerwärmt hat, auf Rotglut, d. h. bis auf 600 bis 800° C., und dann den elektrischen Strom hindurchsendet, so leuchtet es hell weiß und verbraucht für gleiche Lichtstärke nur etwa die Hälfte der Watt, wie eine gewöhnliche Glühlampe. Die Vorwärmung geschieht automatisch durch eine um das Stäbchen gewundene Heizspirale. Außer dem Magnesiastäbchen, dem eigentlichen Brenner, und der Heizspirale besitzt die Lampe noch einen Vorschaltwiderstand und einen kleinen Elektromagneten, welch letzterer dazu dient, den Strom zuerst durch die Heizspirale und dann bloß durch den Brenner zu senden. Die Einrichtung einer solchen Nernstlampe mit selbsttätiger Entzündung zeigt Fig. 464. Das Stäbchen A B ist der eigentliche Leuchtkörper aus Magnesia. Um diesen ist in einigen Windungen ein auf Asbest aufgewundener Heizdraht C D gelegt, welcher zunächst von dem Strom zum Rotglühen gebracht wird und dadurch das Stäbchen A B erwärmt. Es geht nämlich der Strom beim Einschalten der Lampe von der + Klemme über H nach dem Heizdraht C D und dann zur — Klemme. Zugleich könnte der Strom auch von der + Klemme über den kleinen Elektromagneten M und den Vorschaltwiderstand W zu dem Stäbchen A B gehen. Dieses ist aber eben in kaltem Zustand ein Nichtleiter. Die Platindrahtspirale erhitzt nun allmählich in 1/4 bis 1/2 Minute durch Strahlung den Magnesiafaden und dadurch geht nun wirklich der Strom in immer größerer Stärke durch M W A B zur — Klemme und befördert durch seine Joulesche Wärme die Erhitzung desselben und infolgedessen auch seine Leitungsfähigkeit. Sowie dieser Strom eine passende Stärke erreicht hat, wird der Magnet M auch stark genug, seinen Anker H anzuziehen. Dadurch ist aber der Strom in der Platinspirale unterbrochen und der ganze Strom geht nun durch das Stäbchen A B und bringt dieses zum hellen

Fig. 464.



Weißglühen. Der Vorschaltwiderstand besteht aus einem dünnen Eisendraht, der in eine Glasröhre eingeschlossen und in dieser von Wasserstoff umgeben ist. Ohne einen solchen Vorschaltwiderstand würde sich die Temperatur des Heizkörpers und damit die durchgehende Stromstärke so steigern, daß der Brenner durchschmilzt. Der Draht W aber aus Eisen erlangt bei höherer Temperatur, namentlich bei Rotglut, von selbst größeren Widerstand, der die Widerstandsabnahme des Brenners so kompensiert, daß die durchgehende Stromstärke nahezu unverändert bleibt, auch wenn die Spannung des Stromes Schwankungen erfährt. Das Licht der Nernstlampe ist sehr glänzend und weiß; es übertrifft an Glanz und Weiße das Auerlicht. Die Lampen (Modell B) sind, wie die Fig. 465 zeigt, mit einer übergeschobenen Kugelglocke versehen und tragen am Fuß das Edisongewinde, mit welchem sie in die gewöhnlichen Glühlampenfassungen eingeschraubt werden.

Fig. 465.



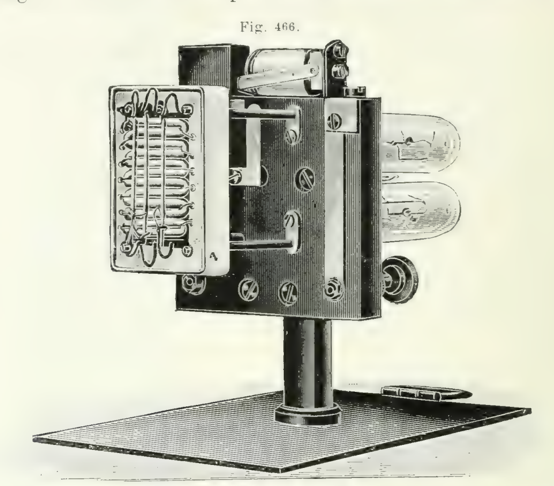
Die einzelnen Teile, Sockel, Vorschaltwiderstand, Brenner und Glocke sind so eingerichtet, daß sie nur einfach ineinander gesteckt zu werden brauchen. Die Lampen können für alle Lichtstärken von 16 bis 250 Hefnerkerzen hergestellt werden. Der Stromverbrauch beträgt bei diesen Lampen nur etwa 1,5 bis 1,7 Watt pro Kerzenstärke.

Die Nernstlampen sind nicht so haltbar, wie die gewöhnlichen Glühlampen. Durchschnittlich nach 300 Brennstunden muß der Glühkörper ersetzt werden, auch nehmen die Lampen schon vorher während des Gebrauches an Leuchtkraft erheblich ab. Da aber die Lampen nicht luftleere Gefäße haben, wie die Glühlampen mit Kohlenfäden, so kann man bei ihnen den Brenner leicht ersetzen. Während gewöhnliche Glühlampen für 220 Volt nicht gut konstruiert werden, brennen Nernstlampen sogar sehr vorteilhaft bei 220 Volt Spannung. Indes sind die Nernstlampen jetzt schon fast auf den Aussterbeetat gesetzt, da die neueren Metallfadenlampen weit bequemer und sogar noch ökonomischer sind wie sie.

Das helle weiße Licht der Nernstlampen macht sie aber sehr geeignet für Zwecke der Projektion von Bildern und Apparaten, für die man sonst in sehr viel umständlicherer Weise nur Bogenlampen benutzen konnte. Die A.E.G. stellt N e r n s t - P r o j e k t i o n s l a m p e n her, wie sie Fig. 466 zeigt. Dieselben enthalten drei Brenner, welche von einer gemein-

schaftlichen Heizspirale erwärmt werden. Die Vorschaltwiderstände aus Eisen befinden sich in 3 Glasröhren hinten an der Lampe. Ein gemeinsamer Magnet schaltet die Heizspirale aus, sobald die Stäbchen in Weiß-

Fig. 466.



glut gekommen sind. Die Lampen brauchen 4 Ampere und geben bei 110 Volt Spannung 700 Kerzen Stärke, bei 220 Volt das Doppelte.

Auf einem zweiten Wege hat man es mit noch größerem Erfolge erreicht, zu ökonomischeren Glühlampen zu kommen. Daß Edison die Kohle wählte, hatte den Grund, daß sie nicht schmilzt. Aber sie zerstäubt eben rasch, wenn ein zu starker Strom in ihr fließt, und das Zerstäuben ist ebenso unangenehm wie das Schmelzen. Man konnte doch wieder versuchen, sehr schwer schmelzbare Metalle als Material für die Glühlampen zu nehmen, nachdem die Regulierung der Ströme ja heute eine einfache und sichere ist, so daß man einen solchen Faden mit Sicherheit auf konstanter Temperatur erhalten kann. Wenn daher die Metallfäden höhere Temperaturen vertragen als die Kohlenfäden, so konnte man mit ihnen ökonomischere Glühlampen konstruieren. Die Metalle, die hierbei in Frage kommen, sind wegen ihres hohen Schmelzpunktes zunächst die drei, Osmium, Tantal und Wolfram, von denen Osmium etwa bei 2500° schmilzt, während Tantal sowie Wolfram (und auch Titan und Molybdän) nach Moissans Untersuchungen im Knallgasgebläse noch nicht schmelzen. Auf diesem Wege suchte zuerst Auer von Welsbach, der berühmte Erfinder des nach ihm benannten Gasglühlichts, eine Metallfadenglühlampe herzustellen. Er benutzte statt der Kohle Osmium für die Glühlampenfäden. Doch wurden die Osmiumlampen sehr rasch durch die vorteilhafteren Lampen aus Tantal und Wolfram überholt.

Daß man auch das Tantal zu einer Glühlampe verwenden könne, bildete vor einigen Jahren eine große Überraschung, welche die Firma

Siemens & Halske der wissenschaftlichen und technischen Welt bot. Das Tantal war bisher noch nie in größeren Mengen überhaupt bekannt gewesen. Von dem metallischen Tantal wußte man, daß es einen sehr hoch, über 2000° liegenden Schmelzpunkt besitzt, so daß Glühlampenfäden aus dieser Materie eine sehr hohe Temperatur annehmen könnten, ohne zu schmelzen. Nach vielen Versuchen gelang es, aus dem Doppelsalz Tantalkaliumfluorid metallisches Tantal von großer Reinheit darzustellen. Dieses erwies sich als ein Metall, welches sich walzen und zu Drähten von großer Feinheit ziehen ließ. Der Schmelzpunkt des reinen Metalls liegt, wie sich durch Messungen ergab, bei zirka 2300° C. Das Metall leitet 6mal so gut wie Quecksilber. Man lernte, wenn auch erst nach mühsamen Versuchen, Drähte von einem Durchmesser von 0,05 bis 0,06 mm zu ziehen und es wurde festgestellt, daß ein Draht von so kleinem Durchmesser, um bei 110 Volt eine Lichtstärke von 32 Kerzen zu ergeben, wenn er pro Kerze nur etwa 1,5 Watt Effekt verbrauchen sollte, die respektable Länge von 700 mm, also mehr als $^2/_3$ m, haben mußte. Es ergab sich nun die Aufgabe, einen Draht von solcher Länge in dem Raum einer gewöhnlichen Glühlampenbirne unterzubringen, da selbstverständlich an den gewohnten Abmessungen der Fassungen, Lüster, Glocken nichts geändert werden durfte. Diese Aufgabe führte auf eine Form der T a n t a l l a m p e, die in Fig. 467 gezeichnet ist. In der Glasbirne befindet sich ein kurzer Glasstab, der oben und unten eine Glaslinse trägt. In diese sind Tragarme aus Metall eingeschmolzen, oben 11, unten 12, so daß jeder obere Arm mitten zwischen zwei unteren Armen liegt. Die Arme sind nach oben resp. unten gebogen und je am Ende zu Häkchen umgebogen. In diese Träger wird nun der lange Tantalfaden zickzackförmig eingelegt. Seine Enden werden durch Platinzuführungen mit dem Sockel der Lampen verbunden. Die Lampen werden für 110 bis 120 Volt Spannung mit den Lichtstärken 10, 16, 25, 32, 50 Kerzen ausgeführt, am verbreitetsten sind diejenigen mit 25 Kerzen Lichtstärke. Sie brauchen um 50 Proz. weniger Strom wie eine gewöhnliche Glühlampe gleicher Lichtstärke, nämlich 1,5 bis 1,7 Watt pro Kerze. Ihre Lebensdauer ist zirka 1000 Brennstunden, wenn sie mit

Fig. 467.



normalem Strom brennen. Aber nach zirka 300 Brennstunden nimmt ihre Lichtstärke bedeutend ab. Während gewöhnliche Glühlampen, wenn sie an einer Stelle durchbrennen, unbrauchbar sind, kommt es bei den Tantallampen vor, daß, wenn der Faden an einer Stelle durchbrennt, er mit seinem Nachbardraht in Berührung kommt und so die unterbrochene Leitung des Stromes wieder herstellt. Eine durchgebrannte Lampe braucht daher gewöhnlich nicht sofort ausrangiert zu werden. Gegen Erschütterungen sind die Tantalfäden ziemlich unempfindlich. Dagegen werden sie durch Wechselströme ziemlich rasch zerstört, so daß die Tantallampen für Wechselstromanlagen nicht gebraucht werden können. Einige verschiedene Armaturen mit Tantallampen, wie sie von den Siemens-Schuckert werken geliefert werden, zeigen Fig. 468 und 469. Die erste Figur stellt eine kugelförmige Tantallampe dar, mit einer sogenannten Azette, mit der die Lampe einfach von der Decke herabhängt. Fig. 469 zeigt eine Deckenbeleuchtung mit 3 Tantallampen.

Fig. 468.

Den größten Fortschritt aber in Bezug auf Metallfadenlampen hat man durch Benutzung des Wolframs als Fadenmetall gemacht. Zuerst war es die Auergesellschaft, welche Wolframlampen unter dem Namen Osramlampen in den Handel brachte. Jetzt gibt es eine große Anzahl von Fabriken, welche solche Wolframlampen herstellen, zum Teil unter besonderer Bezeichnung, wie Just-Wolframlampen (Fabrik in Augsburg), Monowattlampen, Siriuslampen u. s. w. Das Wolframmetall schmilzt erst bei 2850° bis 3000°. Es ließ sich aber zunächst nicht zu Fäden ziehen, wie das Tantal, so daß man indirekte Verfahren zur Erzeugung von Wolframfäden anwenden mußte. Das hauptsächlichste Mittel dazu besteht darin, daß das pulverförmige Wolframmetall mit einem Bindemittel zu einer Paste verarbeitet wird, die dann durch Düsen fadenförmig gespritzt wird. Das Bindemittel wird darauf durch Erhitzen entfernt, wodurch der Wolframfaden durch Zusammensintern der Pulverteile gebildet wird. Allerdings ist eine tadellose Fabrikation solcher Fäden eine schwierige Sache und die Lampen verschiedener Fabriken sind nicht gleichwertig. Das Aussehen der Lampen ist durch Fig. 470 gegeben. Der Hauptvorzug dieser Lampen vor den bisher beschriebenen ist ihr geringer Effektverbrauch. Sie erfordern nur 1,0 bis 1,1 Watt pro Kerze, was gegenüber den Kohlenfadenlampen mit ihren 3,2 Watt und auch den Nernst- und Tantallampen mit ihren 1,5 Watt einen ganz außerordentlichen Fortschritt bedeutet. Dieser geringe Effektverbrauch kommt daher, daß die Fäden der Wolframlampe eine viel höhere Tem-

Fig. 469.



Fig. 470.

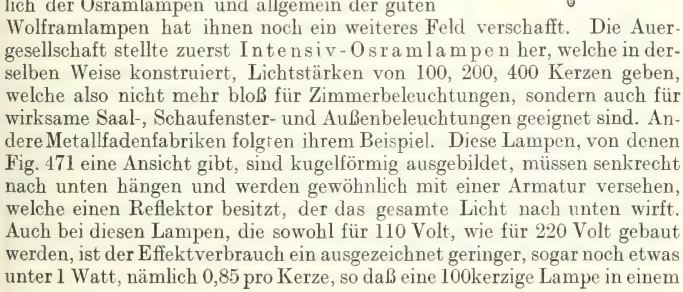
Osram-Lampe D.R.P. Auergesellschaft

peratur aushalten, als die Kohlenfäden. Ihre Temperatur in den Lampen scheint zwischen 1800 und 2000 ⁰ C. zu liegen. Die Fabrikation der Wolframlampen hat sich aber in der letzten Zeit wesentlich geändert. Es ist jetzt gelungen, aus dem Wolframmetall Fäden zu ziehen und die neuen Osram- und Wolframlampen der Auergesellschaft, der A.E.G. und von Siemens & Halske (welch letztere den Namen Wotanlampen erhalten haben) werden nur aus solchen gezogenen Fäden hergestellt. Für die gebräuchlichste Spannung von 110 Volt werden Lampen von 16 bis 50 Kerzen, für 220 Volt solche von 25 bis 50 Kerzen hergestellt. Dabei ist ihre Lebensdauer eine sehr gute, sie beträgt durchschnittlich über 1000 Stunden. Auch die Beschränkung, die die Lampen zuerst verlangten, daß sie nämlich nur senkrecht herabhängend benutzt werden durften, ist für die üblichen kleinen Lampen beseitigt. Diese können in allen Lagen brennen. Gegen Erschütterungen waren die gesprizten Fäden sehr empfindlich, die gezogenen Fäden sind es aber nicht. Wechselströme vertragen sie ebensogut wie Gleichströme.

Das langjährige Ideal der Glühlampentechnik, die sogenannte Einwattlampe, die, ohne sonstige Nachteile, 1 Watt pro Kerze verbraucht, ist durch die Wolframlampen nahezu erreicht worden.

Die Tantal- und Wolfram(Osram-)lampen haben wegen ihres viel geringeren Stromverbrauches die gewöhnliche Glühlampe bereits vielfach aus dem Felde geschlagen, obwohl ihr Preis bisher ein bedeutend höherer, 4- bis 6mal so hoher war, als der von Kohlenfadenlampen. Zwar machen sich die höheren Anschaffungskosten solcher Lampen schon nach einigen hundert Brennstunden durch den geringen Stromverbrauch bezahlt, trotzdem aber bilden diese doch den Grund, warum die Bäume dieser neuen Erfindungen nicht gleich zum Himmel wachsen, wenn auch durch sie das Feld, das die Kohlenfadenlampe jahrzehntelang unbestritten allein behauptet hat, nun von Tag zu Tag mehr eingeschränkt wird und bald noch mehr vermindert werden wird, da der Preis der Wolframlampen nun erheblich heruntergesetzt wurde.

Fig. 471.



Aber die ausgezeichnete Ökonomie namentlich der Osramlampen und allgemein der guten Wolframlampen hat ihnen noch ein weiteres Feld verschafft. Die Auergesellschaft stellte zuerst Intensiv-Osramlampen her, welche in derselben Weise konstruiert, Lichtstärken von 100, 200, 400 Kerzen geben, welche also nicht mehr bloß für Zimmerbeleuchtungen, sondern auch für wirksame Saal-, Schaufenster- und Außenbeleuchtungen geeignet sind. Andere Metallfadenfabriken folgten ihrem Beispiel. Diese Lampen, von denen Fig. 471 eine Ansicht gibt, sind kugelförmig ausgebildet, müssen senkrecht nach unten hängen und werden gewöhnlich mit einer Armatur versehen, welche einen Reflektor besitzt, der das gesamte Licht nach unten wirft. Auch bei diesen Lampen, die sowohl für 110 Volt, wie für 220 Volt gebaut werden, ist der Effektverbrauch ein ausgezeichnet geringer, sogar noch etwas unter 1 Watt, nämlich 0,85 pro Kerze, so daß eine 100kerzige Lampe in einem

Netz von 110 Volt kaum 1 Ampere verbraucht, eine 400kerzige kaum 4 Ampere. Dadurch sind sie aber den kleinen Bogenlampen bis zu 400 Kerzen Stärke ökonomisch nicht nur gleichwertig, sondern überlegen geworden, so daß sich die Teilung des Bedarfs zwischen Bogenlicht und Glühlicht nun wesentlich zu Gunsten des Glühlichts verschoben hat. Und dabei haben diese Intensivglühlampen eben alle Vorzüge des Glühlichts vor dem Bogenlicht. Sie werden einfach in ihre Fassungen eingeschraubt, sie brauchen keine Regulierung, keine Bedienung, keinen Kohlenersatz und haben eine durchschnittliche Lebensdauer von 800 Brennstunden. An diesem Übergreifen der Glühlampen in die bisherige Eigentumssphäre der Bogenlampen kann man am besten den eminenten Fortschritt erkennen, den die Glühlampentechnik durch die Metallfadenlampen gemacht hat.

Umgekehrt kann man natürlich auch kleine Lampen konstruieren, welche für geringe Spannungen (von 2 bis 30 Volt) berechnet sind, also durch einzelne Akkumulatoren oder Trockenelemente schon betrieben werden können. Sie haben natürlich auch nur geringe Lichtstärken, von $^1/_{10}$ Kerze an. Benutzt

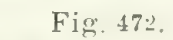
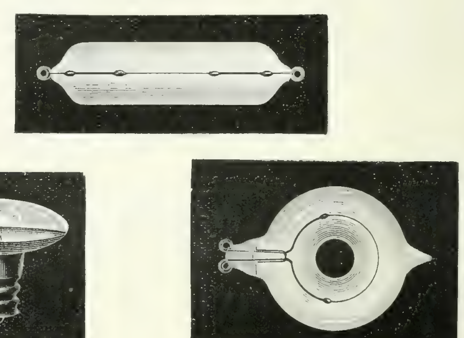


Fig. 472.



werden sie vielfach für ärztliche Zwecke, für Taschenlaternen, zum Ausleuchten von Gefäßen u. s. w. Fig. 472 stellt einige solche Lampen mit Kohlenfäden, Fig. 473 einige derartige Lampen mit Metallfäden dar. Die ringförmige Lampe in Fig. 472 dient für Augenärzte zur Beleuchtung der Netzhaut.

Gewöhnlich werden die Lampen in Glocken eingesetzt, welchen irgend eine passende Form, z. B. die eines Kelches, gegeben wird, so daß die Glühlichtbeleuchtung auch vorteilhaft für Dekoration von Räumen verwendet wird. Darin ist sie sogar der Gasbeleuchtung überlegen, da man Glühlampen, wegen ihrer Ungefährlichkeit, auch nahe an Wänden oder Täfelungen, in Nischen, in Blumenbouquets u. s. w. leicht anbringen kann. Im übrigen werden die Glühlampen in allen möglichen Anordnungen verwendet, entweder als Einzellampen oder in Lüstern von einigen oder vielen Lampen, so daß sich die Glühlichtbeleuchtung in nichts von der Gasbeleuchtung unterscheidet. Tragbare oder verstellbare Lampen müssen durch Leitungsschnüre mit derjenigen

Leitung verbunden sein, von der der Strom entnommen wird. Zu dem Zweck erhalten sie Steckkontakte, welche in Anschlußdosen

Fig. 473.







eingesteckt werden. Eine solche Einrichtung zeigt Fig. 474. Eine Dose aus Ebonit oder Porzellan wird an der Wand befestigt und die Leitung wird zu ihr so geführt, daß in jedem der beiden Löcher je einer von den Leitungsdrähten endet und zwar in einer metallischen Auskleidung der Löcher. In die Dose kann nun der darüber gezeichnete Stöpsel (Steckkontakt) eingesetzt werden, so daß dessen federnde Füße in die Löcher gesteckt werden. Der Stöpsel selbst wird z. B. an der tragbaren Lampe, Fig. 475, vermittels der Leitungsschnur so befestigt, daß die Enden dieser Schnur einerseits mit den Kontakten der Fassung, andererseits mit den beiden Füßen des Stöpsels verbunden sind.

Fig. 474.

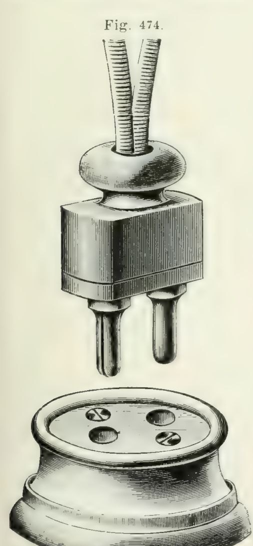


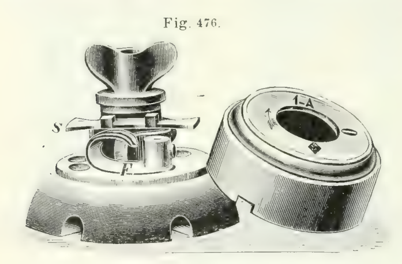
Fig. 475.



Lampen, die zugänglich sind, und einzeln entzündet oder ausgelöscht werden sollen, werden in ihren Fassungen mit einem Hahn versehen, der beim Drehen einen Kontakt hervorbringt oder unterbricht. Man kann jedoch einzelne Lampen oder viele zusammen auch bequem von der Ferne entzünden oder auslöschen, indem man nur in die Leitung zu den Lampen

einen Ausschalter irgendwo anbringt. Diese Ausschalter, von denen Fig. 476 eine vielbenutzte Form geöffnet zeigt, bestehen aus einem an dem Griff befestigten ebenen Metallstück S, das beim Drehen des Griffes entweder auf den beiden federnden Metallstreifen F aufliegt, oder frei in der Luft sich befindet. Die Federn sind mit der Leitung verbunden. Durch Drehen des Griffes bewirkt man also abwechselnd Kontakt und Unterbrechung. Die ganze Kontaktvorrichtung befindet sich in einer Hülle von Holz, Porzellan oder Metall. Die Hülle kann natürlich auch geschmackvoll mit Verzierungen ausgestattet werden. Bei anderen Formen dieser Schalter sind umgekehrt die Federn an dem beweglichen Mittelstück aus Metall befestigt und machen beim Drehen desselben Kontakt mit festen Metallstücken.

Fig. 476.



Es wird also z. B. die Leitung, welche in ein Zimmer führt und zwischen deren beide Drähte alle Lampen dieses Zimmers eingeschaltet sind, zuerst an diesen Ausschalter geführt, so daß der eine Leitungsdraht unterbrochen ist und die beiden Enden mit den federnden Metallstücken verbunden sind. Durch eine bloße Drehung des Griffes kann man dadurch sofort das ganze Zimmer erleuchten oder verdunkeln. Auch kann man die Ausschalter an einer Leitungsschnur von der Decke herabhängen lassen, wie Fig. 477 zeigt. Ein Druck auf den Kopf der Birne dreht die Kontaktstücke und bringt dadurch Kontakt hervor, ein folgender Druck dreht sie weiter und hebt den Kontakt wieder auf u. s. f. Gerade diese Leichtigkeit des Anzündens und Auslöschens von der Ferne macht das Glühlicht äußerst bequem und gibt ihm manche Vorzüge vor dem Gaslicht. Man kann diese Schalter auch so einrichten, daß sie mehrere Kontakte besitzen, wodurch sie Umschalter werden. So kann man es z. B. durch einen Schalter einrichten, daß je nach seiner Stellung von einem Lüster ein Viertel der Lampen, oder drei Viertel, oder alle Lampen brennen.

Fig. 477.



Fig. 478.

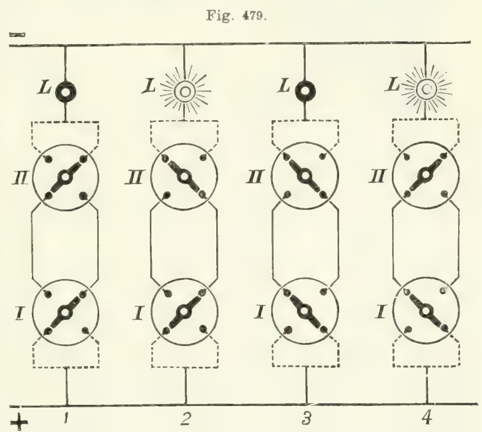
Solche Schalter nennt man Serienschalter. Das Schema einer solchen Einrichtung ist in Fig. 478 gezeichnet. Zwischen die beiden horizontal gezeichneten Hauptleitungen sind zwei parallel geschaltete Leitungen gelegt, von denen die erste eine Lampe, die zweite zwei enthält. Der Serienschalter, der durch einen Kreis mit Kontakten und dem doppelarmigen Griff dargestellt ist, gestattet nun, wenn man den Griff in der

Richtung des Uhrzeigers dreht, folgende Verbindungen zu machen. In der ersten Stellung ist alles ausgeschaltet, in der zweiten brennt die Einzellampe, in der dritten brennen alle drei Lampen, in der vierten bloß die beiden zusammengeschalteten. Solche Schaltungen kann man natürlich in beliebiger Komplikation ausführen.

Häufig will man eine Glühlampe oder einen Lüster nicht bloß von einer Stelle aus anzünden und auslöschen können, sondern von zwei oder mehr Stellen aus. Bei der Treppenbeleuchtung z. B. will man beim Eintreten in die Haustüre die Treppenlampen anzünden und an der Wohnungstüre sie auslöschen können oder umgekehrt. Die zu diesem Zweck dienenden Ausschalter bezeichnet man als Korrespondenzschalter.

Diese werden gewöhnlich der bequemeren Verbindung halber mit 4 Kontakten hergestellt, obwohl man nur 2 Kontakte braucht. In Fig. 479 sieht man die beiden Schalter I und II zwischen die negative und die positive Leitung mit einer Lampe L eingeschaltet. Zwei Kontakte jeden Schalters sind untereinander und mit je einer der beiden Leitungen verbunden, die beiden anderen Kontakte der beiden Schalter sind miteinander verbunden. Man sieht aus den vier Stellungen 1, 2, 3, 4 der drehbaren Stücke in den beiden Schaltern, daß, wenn man in einem der beiden Schalterdendrehbaren Griff weiterdreht, die Lampe abwechselnd hell und dunkel wird.

Fig. 479.

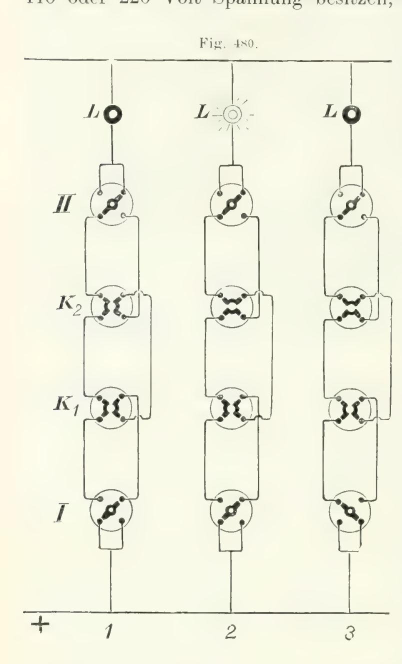


Will man von mehr als zwei Stellen aus die Lampen anzünden, so muß man die weiteren Stellen mit sogenannten Kreuzschaltern versehen, bei denen die drehbare Achse zwei Federsysteme trägt, die abwechselnd von den 4 Kontakten entweder je zwei nebeneinander liegende oder je zwei einander gegenüber liegende verbinden, oder auch abwechselnd das eine Paar und dann das andere Paar nebeneinander liegende Kontakte verbinden. Der letztere Fall ist in der Zeichnung Fig. 480 angenommen, bei der von 4 Stellen (I, K_1, K_2, II) aus die Lampe angezündet oder ausgelöscht werden kann. In dieser Figur sind I und II zwei Korrespondenzschalter wie in Fig. 479 und K_1 und K_2 sind zwei Kreuzschalter, L ist die Lampe. Drei verschiedene Stellungen der Schalter sind in 1, 2, 3 gezeichnet. Welchen von den 4 Schaltern man auch weiter dreht, immer wird abwechselnd die Lampe hell oder dunkel sein.

Eine Gefahr bietet bei allen elektrischen Anlagen der sogenannte

Kurzschluß. Da nämlich in jedem Haus, in welchem elektrische Einrichtung besteht, die beiden voneinander isolierten Leitungen, welche 110 oder 220 Volt Spannung besitzen, durch alle Stockwerke und alle Zimmer laufen, so ist mit größter Sorgfalt darauf zu achten, daß diese Leitungen nie in eine unbeabsichtigte leitende Verbindung kommen. Alle Lampen, alle Heizapparate, alle Motoren sind zwar zwischen diese Leitungen geschaltet, aber die Widerstände dieser Apparate und der Querschnitt der in ihnen vorhandenen Drähte ist so abgemessen, daß sie nur die von vornherein normierte Stromstärke höchstens erhalten können. Wenn aber an irgend einer Stelle die beiden Hauptleitungen in unbeabsichtigten Kontakt kommen, also kurz geschlossen werden, so kann die Stromstärke in der ganzen Leitung außerordentlich groß werden, wodurch dann auch starke Joulesche Wärme, also Erhitzung der Drähte eintritt, und damit Verbrennung ihrer Umspinnung und benachbarter Holz- oder Stoffteile, kurz rapide Feuergefährlichkeit. Sind z. B. die beiden Drähte so ungenügend an der Wand befestigt, daß der eine auf den andern fallen kann und ist ihre Umspinnung etwa durch einen Zufall beschädigt, so können momentan Stromstärken von 100 und mehr Ampere in den Leitungen auftreten. Um diese Gefahr zu vermeiden, müssen erstens die Leitungen mit der größten Sorgfalt gelegt und isoliert werden. Ferner aber muß dafür gesorgt werden, daß alle Apparate, also in unserem Falle die Glühlampen, gegen etwaige Zufälle, die durch zu starke Ströme entstehen, geschützt werden. Dieser Schutz ist zuerst von Edison angegeben worden.

Fig. 480.



Er besteht darin, daß an allen passenden Stellen, an allen Verzweigungspunkten der Leitungen dünne Streifen aus Blei oder Silber in die Leitung eingeschaltet werden, sogenannte Sicherungen, welche so abgemessen werden, daß sie rasch schmelzen, wenn ein stärkerer Strom durch sie hindurchfließt als derjenige, den sie noch gerade aushalten sollen. Sowie der Strom momentan eine zu große Stärke bekommt, welche für die Lampen gefährlich sein könnte, schmilzt die Sicherung weg und unterbricht dadurch den Strom. Es erlöschen dann zwar alle Lampen, die hinter dieser Sicherung eingeschaltet sind, aber sie bleiben intakt und es läßt sich der Draht mit Leichtigkeit ersetzen.

Solche Sicherungen, die zum Teil aus Bleistreifen, jetzt aber hauptsächlich aus Silberstreifen hergestellt werden, werden in die Hauptleitungen, ferner in die Zweigleitungen und endlich an jeder Abzweigung für eine Lampengruppe, also z. B. vor jedem Zimmer, eingeschaltet. Eine zweckmäßige Form der Sicherung besteht darin, daß man in einen Stöpsel aus Gips (Fig. 481), der am Boden eine Metallplatte und an der Seite eine metallische Schraube trägt, den Bleistreifen zwischen Grundplatte und Schraube befestigt. Die Stöpsel werden in einen Sicherheitsschalter (Fig. 482) eingeschraubt, zu dem die Leitungen von der Maschine geführt werden.

Fig. 481.

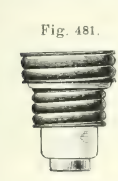


Fig. 482.

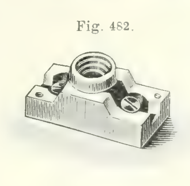
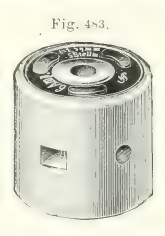


Fig. 483.



Man verfertigt die Stöpsel für die Stromstärken 6, 10, 15, 20, 25 u. s. w. Ampere. Eine andere vielbenutzte Art von Sicherungen sind die Patronensicherungen der Siemens-Schuckertwerke. Fig. 483 stellt eine solche Patrone dar. In dieser befindet sich der Schmelzdraht in zickzackförmigen Windungen, umgeben von isolierendem Pulver. Die Patrone wird auf einen Patronenbolzen geschoben und durch einen auf diesen aufgeschraubten Porzellandeckel festgehalten, so daß der Schmelzstreifen die Verbindung zwischen den beiden getrennten Teilen des Leitungsdrahtes bildet. Man trägt aus Gründen der Sicherheit dafür Sorge, daß die Sicherungen unverwechselbar sind, daß also nicht etwa eine Sicherung, die für 20 Ampere bestimmt ist, in eine Leitung eingesetzt werden kann, die nur 6 Ampere aushalten soll. Neuerdings sind von den Siemens-Schuckertwerken die sogenannten Diazed-Sicherungen eingeführt worden, bei denen die Unverwechselbarkeit dadurch hervorgebracht ist, daß die Fußdurchmesser jeder Sicherungsgröße verschieden sind, so daß nur immer eine Sicherung derselben Größe in dieselbe Unterlage paßt. Bei hochgespannten Strömen von mehr als 500 Volt müssen die Sicherungen anders konstruiert werden, worauf aber hier nicht eingegangen werden kann.

Für kleine Einrichtungen, für einzelne Privathäuser z. B. mit 50, 60 Lampen, für die man eine besondere Maschine aufstellen muß, ist die elektrische Beleuchtung etwas kostspielig und ist daher nur da anwendbar, wo die Kosten gegenüber der Bequemlichkeit und Schönheit des Glühlichts keine Rolle spielen. Wohl aber ist die eigene Glühlichtbeleuchtung für große Hotels, Fabriken, Vergnügungslokalitäten auch in Bezug auf den Kostenpunkt der Gasbeleuchtung meistens nicht unterlegen, namentlich wenn Metallfadenlampen genommen werden. In diesen Fällen ist es aber gewöhnlich vorteilhaft, die Beleuchtung nicht direkt von der Maschine besorgen zu lassen, sondern indirekt, indem man durch die Maschine

zunächst eine Akkumulatorenbatterie laden läßt und von dieser die Ströme für die Beleuchtung entnimmt. Der Vorteil besteht darin, daß erstens die Spannung der Akkumulatoren sehr konstant bleibt, zweitens aber, daß man von ihnen zu jeder Zeit Strom erhalten kann, wenn sie einmal geladen sind, also auch in der Nacht, so daß man nicht nötig hat, die Dynamomaschine Tag und Nacht laufen zu lassen.

Für die Beleuchtung von Privathäusern ist es natürlich am bequemsten und vorteilhaftesten, wenn die elektrischen Ströme in großen Zentralen erzeugt und von diesen aus in die einzelnen Häuser ganzer Stadtteile oder Städte gesendet werden, ganz wie bei der Gasbeleuchtung von den großen Gasometern aus das Gas geliefert wird. Solche Zentralen sind in den meisten großen, mittleren und kleinen Städten ausgeführt worden. Insbesondere sind die Elektrizitätswerke in Berlin eine großartige Anlage, welche einen sehr großen Teil von Berlin mit Elektrizität versorgt. Die Einrichtungen solcher Zentralstationen, sowie überhaupt die ganze Frage nach der Verteilung der Elektrizität von einer Stelle aus auf einen weiten Bezirk sind in Kap. 9 dieses Abschnittes behandelt.

Das elektrische Glühlicht beruht auf der Jouleschen Wärme. Da nun aber ein Draht durch den elektrischen Strom nicht bloß zum Glühen erhitzt wird, so daß er Licht ausstrahlt, sondern da er durch mehr oder minder starke Ströme auf jeden beliebigen Grad erwärmt werden kann, so lag der Gedanke sehr nahe, diese Joulesche Wärme durch passende Anordnung der Drähte auch zum K o c h e n und H e i z e n zu benutzen, also diese Wärme etwa in Gefäßen zu entwickeln, in welchen man Wasser zum Sieden oder durchströmende Luft für Heizzwecke auf hohe Temperatur bringen will.

Eine nähere Betrachtung ergibt aber zunächst, daß dieser Gedanke, obwohl er nahe liegt, doch gewissen Schwierigkeiten unterliegt, Schwierigkeiten, die sich nicht auf die technische Ausführbarkeit, sondern auf die Ökonomie dieses elektrischen Betriebes beziehen. Die Ökonomie nämlich hängt natürlich ab von dem Preise, zu dem die elektrische Energie geliefert werden kann. Unter normalen Umständen, wenn die elektrischen Ströme von Dynamomaschinen geliefert werden, die durch Dampfmaschinen getrieben werden, ist die elektrische Energie, wie man leicht einsieht, zunächst viel zu teuer für Heizzwecke. Denn in den Dampfmaschinen werden nur etwa 8 Proz. der Verbrennungswärme der Kohlen wirklich in mechanische Arbeit verwandelt, und von diesen 8 Proz. wird auch nur ein Teil, etwa 90 Proz. derselben, durch die von den Dampfmaschinen getriebenen Dynamomaschinen in elektrische Energie verwandelt, die man dann in den Heizapparaten wieder in Wärme umsetzt. Wenn man dieselbe Kohlenmenge, die man zum Betrieb der Dampf- und Dynamomaschinen verwendet hat, direkt in Öfen verbrennen würde, so würde man, auch bei nicht besonders zweckmäßig konstruierten Öfen, etwa 60 Proz. der Verbrennungswärme zur Verfügung haben, also etwa 8mal so viel als bei der indirekten Erwärmung durch den elektrischen Strom. Rationell ist also das elektrische Kochen und Heizen in diesem, zunächst vorliegenden Fall keineswegs.

Die Sachlage wird aber in zwei Fällen anders. Erstens nämlich, wenn die Dynamomaschinen nicht durch Dampfmaschinen oder Gas-

motoren getrieben werden, sondern durch Wasserkräfte. Wenn bei diesen die Einrichtung einmal gemacht ist, so ist es ganz gleichgültig in Bezug auf die Kosten, ob man Strom entnimmt oder nicht. Die eigentliche elektrische Energie wird also dann kostenlos geliefert — abgesehen von der in jedem Falle notwendigen Verzinsung des Kapitals — und daher kann auch das Heizen und Kochen dabei rationeller sein. Zweitens aber bürgert sich in denjenigen Städten, in denen der elektrische Strom in großen Zentralstationen erzeugt und überall hingeleitet wird — und das ist jetzt schon eine sehr stattliche Anzahl — die elektrische Heizung sehr rapid aus folgendem Grunde ein. Bei solchen Zentralstationen werden nämlich die Kosten der Anlage und des Betriebes gewöhnlich schon durch die für die Beleuchtung abgegebene Energiemenge gedeckt. Der Preis der elektrischen Energie für andere als Beleuchtungszwecke, also auch für Heizzwecke, wird deswegen sehr viel niedriger normiert und kann es auch schon deswegen werden, weil man eine viel bessere Ausnutzung der gesamten Maschinenanlage erzielt, wenn man sie nicht bloß des Abends, wo sie für die Beleuchtung notwendig ist, sondern auch am Tage in Betrieb nimmt. Und die Benutzung der Apparate zum Kochen und Heizen findet ja in der Hauptsache in den Tagesstunden statt. Es kommt also wesentlich auf die Kosten an, zu welchen man die elektrische Energie haben kann, um zu entscheiden, ob es auch ökonomisch ratsam ist, mit elektrischen Apparaten zu heizen und zu kochen, also indirekt mit der Jouleschen Wärme statt direkt mit der Wärme der Kohlen oder des verbrennenden Leuchtgases.

Wenn aber die Frage der Ökonomie erledigt ist, so bietet der elektrische Betrieb auch in diesem Gebiet eine große Menge Vorzüge, nämlich solche der Gefahrlosigkeit, der Reinlichkeit, der steten Betriebsbereitschaft, der großen Bequemlichkeit. Da ein Strom in einem Leiter fortwährend Wärme entwickelt, solange er fließt, so handelt es sich nur darum, diese Wärme auf andere Körper zu übertragen, auf die Metallwände von Gefäßen, in denen man Wasser u. s. w. kocht, oder auf die Luft eines Zimmers beim Heizen. Dies geschieht dadurch, daß man die sich erwärmenden Drähte mit diesen Körpern in enge Berührung bringt. Wichtig ist natürlich dabei, daß man die Drähte, in denen die Joulesche Wärme erzeugt wird, so anordnet, daß möglichst die ganze Wärme nutzbar verwendet wird. Bevor wir jedoch die Anordnungen besprechen, die wirklich für diese Zwecke getroffen wurden, wollen wir uns über die Größe des erforderlichen Stromverbrauchs ein Urteil bilden.

Die Energie, die ein Strom von gegebener Spannung und gegebener Stromstärke enthält, ist einfach gleich dem Produkt aus der Zahl der Watt, die dieser Strom mit sich führt, und der Zeit, also gleich dem Produkt aus der Zahl der Volt und der Zahl der Ampere und der Zeit. Diese Energie setzt sich in den Drähten in ihrem vollen Betrage in Wärme um und die entwickelte Wärmemenge ist also ebenso gleich dem Produkt aus den Watt und der Zeit. Diese Wärmemenge ist dann, wenn man die Zeit in Stunden rechnet, in Wattstunden ausgedrückt. Nun drückt man aber Wärmemengen gewöhnlich in Kalorieen aus, wobei man unter einer Kalorie diejenige Wärmemenge versteht, durch welche 1 Liter Wasser in seiner Temperatur um 1° erhöht wird. Da (nach

S. 369) 736 Watt gleich 1 Pferdekraft sind, so sind 736 Wattstunden gleich 1 Pferdekraftstunde. Nun leistet 1 Pferdekraft in jeder Sekunde 75 Kilogrammeter, also in 1 Stunde 3600 $\times$ 75 = 270 000 Kilogrammmeter Arbeit, also ist 1 Wattstunde gleich $\frac{270\,000}{736}$ Kilogrammeter, das ist rund 367 Kilogrammeter. Die Physik lehrt aber, daß 1 Kalorie gleich der Arbeit von 427 Kilogrammetern ist. Mithin entspricht eine Wattstunde einer Wärmemenge von $\frac{367}{427} = 0{,}86$ Kalorieen oder eine Kalorie entspricht 1,16 Wattstunden. Um 1 Liter Wasser von 0^0 auf 100^0 zu erwärmen, braucht man 100 Kalorieen, also rund 120 Wattstunden. Berechnen wir also nun, wieviel Watt ein Strom haben müßte, der in 5 Minuten 1 Liter Wasser von Zimmertemperatur (15^0) zum Siedepunkt (100^0) bringen könnte. Zu dieser Erwärmung sind offenbar 85 Kalorieen, also 99 Wattstunden nötig. In Wirklichkeit wird man aber wegen der notwendigen Wärmeverluste nicht bloß 99 Wattstunden, sondern ca. 120 Wattstunden nötig haben. Da diese in 5 Minuten, also in $^1/_{12}$ Stunde geleistet werden sollen, so gehört ein Strom mit dem Effekt 12 $\times$ 120 = 1440 Watt dazu. Ist der Strom also etwa aus einer Leitung von 110 Volt genommen, so muß er eine Stärke von 13,1 Ampere haben; ist er aus einer Leitung von 60 Volt genommen, so braucht er eine Stärke von 24 Ampere u. s. w. Man sieht aus diesen Betrachtungen, daß ein Strom zur gleichen Wärmeleistung um so größeren Effekt, um so mehr Watt haben muß, in je kürzerer Zeit diese Leistung geschehen soll. Es werden also die Apparate, welche schnelle Erwärmung erzielen sollen, mit viel größeren Stromstärken betrieben werden müssen, als diejenigen, welche langsame Erwärmung, oder nur ein Warmhalten hervorbringen sollen.

Infolgedessen richtet man praktisch die Apparate so ein, daß sie mehrere parallel geschaltete Heizdrähte besitzen, von denen man entweder alle oder einige zu gleicher Zeit vom Strom durchfließen lassen kann. Zu rascher Erwärmung benutzt man sämtliche parallel geschaltete Drähte zu gleicher Zeit, wodurch, da der Widerstand bei Parallelschaltung klein ist, bei gegebener Spannung ein starker Strom und daher erhebliche Joulesche Wärme erzeugt wird. Zu langsamer Erwärmung oder zum bloßen Warmhalten benutzt man nur einige von den parallel geschalteten Drähten oder nur einen. Diese verschiedenartige Verbindung wird gewöhnlich durch Umstecken eines Stöpsels hervorgebracht.

Wenn in den Leitungen, an welche ein Heizapparat angeschlossen werden soll — und auch die Heizapparate werden, wie Glühlampen, Motoren u. s. w., alle parallel geschaltet —, eine bestimmte unveränderliche Spannungsdifferenz herrscht, so ist es leicht, den Widerstand des Drahtes zu bestimmen, der eine bestimmte Erwärmung in bestimmter Zeit hervorbringen soll. Ist z. B. diese Spannungsdifferenz 100 Volt und sollen in dem Apparat in 5 Minuten 300 Kalorieen erzeugt werden, so würde die Rechnung folgendermaßen zu führen sein. Zu 100 Kalorieen braucht man, wie oben erwähnt, abgesehen von den Verlusten, rund 120 Wattstunden, also zu 300 Kalorieen braucht man 360 Wattstunden. Da 1 Watt gleich 1 Volt mal 1 Ampere ist, so braucht man

bei der gegebenen Spannung von 100 Volt eine Elektrizitätsmenge von 3,60 Amperestunden. Da diese von dem Strom in dem zwölften Teil einer Stunde geliefert werden sollen, so muß der Strom die Stärke 43,2 Ampere haben. Wir wissen also, daß wir Drähte brauchen, in denen bei 100 Volt Spannung ein Strom von 43,2 Ampere fließt. Folglich muß der Draht, resp. das System von parallel geschalteten Drähten den Widerstand 100 Volt dividiert durch 43,2 Ampere, das ist 2,3 Ohm, haben. Damit sind die Dimensionen des Drahtsystems gegeben. Will man z. B. lauter Drähte anwenden, deren jeder nur 3 Ampere führen soll, so muß man zirka 15 solche Drähte parallel schalten.

Wenn aber die Spannung in den Leitungen nicht ganz konstant gehalten wird — und Schwankungen bis zu 10 Proz. kommen im praktischen Betriebe vor —, so fließen stärkere Ströme durch die Drähte, als wofür sie normiert sind, und die Gefahr liegt vor, daß ein Draht, der zu stark erhitzt wird, dadurch wegschmilzt und die Leitung unterbricht. Man muß deshalb die Drähte so wählen, daß sie durch den normalen Strom nicht zu heiß werden, resp. daß sie ihre Wärme möglichst vollständig abgeben können, und insbesondere muß man schwer schmelzbare Drähte zu diesen Apparaten benutzen.

Man nimmt also zum Teil Drähte aus Nickel oder einer Nickellegierung. Diese aber würden, wenn die Luft zu ihnen Zutritt findet, infolge der hohen Temperatur oxydieren und dadurch abbrennen. Um dies zu verhindern, umgibt man sie mit einer Emailmasse, die der Hitze Widerstand leistet und die den Zutritt der Luft verhindert. Bei den unten beschriebenen Heizapparaten von Helberger werden auf die einzelnen Drähte Glasperlen direkt aufgereiht, um eben die Oxydation zu vermeiden. Andererseits nimmt man aus demselben Grunde als Heizdrähte nicht solche von Nickel, sondern solche aus edlem Metall, insbesondere aus Platin, da diese ja auch bei hohen Temperaturen, bei dauernder Rotglut, nicht oxydieren. Derartig sind die Apparate von Stotz in Stuttgart eingerichtet. Die Platindrähte werden dabei auf eine Asbestschnur aufgewickelt und zwar wird die Anordnung meistens so getroffen, daß jede solche Spirale 1 Ampere aufnehmen kann. Die Drähte werden nun bei diesem System in Tonkörper eingebettet, welche in die-

Fig. 484.

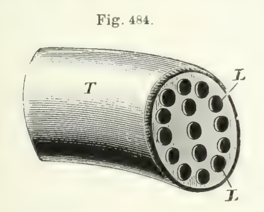
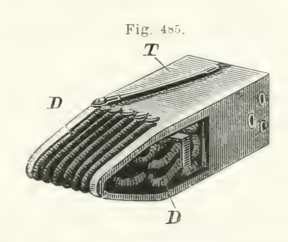


Fig. 485.



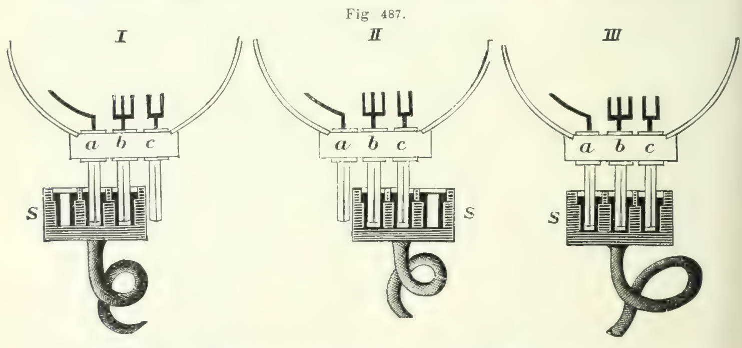
jenigen Formen gebracht werden, wie sie zu dem betreffenden Apparat passen. Fig. 484 zeigt ein Stück eines gebogenen Tonkörpers T mit den Löchern L L zur Aufnahme der Drähte. Fig. 485 zeigt einen anderen Tonkörper, auf welchem die Drähte DD schon angebracht sind. Für

Apparate, welche sehr viel Wärme entwickeln sollen, ist die Anwendung des Platins allerdings zu kostspielig und die Platindrähte werden dann durch Drähte aus einer Nickellegierung ersetzt, jedoch so, daß die Temperaturerhöhung der Drähte keine zu große wird.

Diese Tonkörper mit ihren Drähten, welche als Heizkörper bezeichnet werden, werden nun in die betreffenden Gefäße eingeschlossen, welche erwärmt werden sollen. So zeigt Fig. 486 einen Wasserkessel. Die Heizkörper befinden sich in dem Boden des Kessels, so daß die Drähte möglichst nahe an den Heizflächen sich befinden. An jedem Apparat gehen von den Heizdrähten Stifte nach außen, in welche ein Kontakt paßt (der in Fig. 486 angesteckt ist). Dieser Kontakt wird durch eine Leitungsschnur an die Zimmerleitung angeschlossen. Um die Erwärmung der Apparate regulieren zu können, sind immer mehrere Heizdrähte getrennt im Apparat so angeordnet, daß sie nach Belieben alle oder einzeln oder in Gruppen zur Verwendung kommen. Die Art der Ausführung dieser Schaltungen zeigt Fig. 487. Es befindet sich nämlich in dem Heizgefäß erstens eine Leitung, welche bei a anfängt und in dem Mittel-

Fig. 486.

Fig 487.



draht von b aufhört, zweitens eine Doppelleitung (zwei parallel geschaltete Drähte), welche bei c anfangen und in den beiden äußeren Linien in b enden. Wird nun der dreiteilige Stöpsel S so gesteckt wie in Fig. I, so geht der Strom nur durch die eine Leitung a b, die Erwärmung ist schwach; wird er so gesteckt wie in II, so geht der Strom durch die Doppelleitung c b, die Erwärmung ist eine mittlere, und wird er endlich so gesteckt wie in III, so geht der Strom sowohl von a als von c nach b, die Erwärmung ist eine starke.

Ähnliche Einrichtungen sind auch bei den Apparaten von Helberger in München zur Regulierung getroffen. Die Heizdrähte werden bei diesen Apparaten, von denen z. B. Fig. 488 einen Inhalationsapparat zeigt, so

angeordnet, daß sie, durch aufgereihte Glasperlen isoliert, direkt in Rinnen gelegt sind, die im Innern der Gefäße an den passenden Stellen eingeschnitten sind.

Anders in der Konstruktion sind die zuerst durch die Gesellschaft „Prometheus“ in Frankfurt a. M. hergestellten elektrischen Koch-

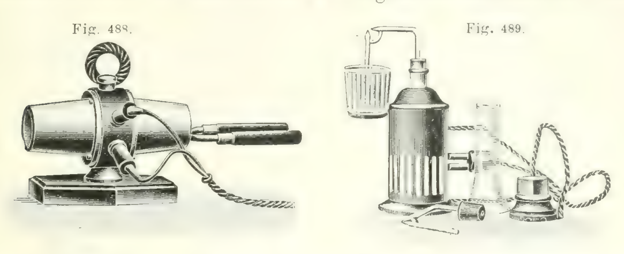


Fig. 488. Fig. 489.

apparate. Bei diesen bestehen die Heizkörper aus Glimmerstreifen, auf welchen eine sehr dünne Metallschicht aus Silber eingebrannt ist. Die versilberten Glimmerstreifen sind dann die einzelnen Heizkörper, welche beliebig zusammengesetzt werden. Die Streifen können sowohl rechteckig wie ringförmig sein, so daß sie sich allen Apparatformen leicht anschließen. Der Nutzeffekt dieser Apparate, die ebenfalls für alle Zwecke des Hauses und der Küche hergestellt werden, ist infolge der Konstruktion ein sehr hoher. Fig. 489 zeigt einen Brennscherenwärmer von Prometheus mit ringförmigen Glimmerheizkörpern.

Solche Heizapparate der verschiedenen Konstruktionen werden nun nicht bloß für die Küche im kleinen und großen gefertigt, von der einfachen elektrischen Pfanne an bis zum vollständigen elektrischen Herd, sie werden auch für industrielle Zwecke, als Leimkocher, Siegellackkocher, Abdampfschränke, Brennstempel, Vergoldepressen, Satinierapparate u. s. w. hergestellt und zeichnen sich überall durch besondere Bequemlichkeit, Reinlichkeit und Gefahrlosigkeit aus.

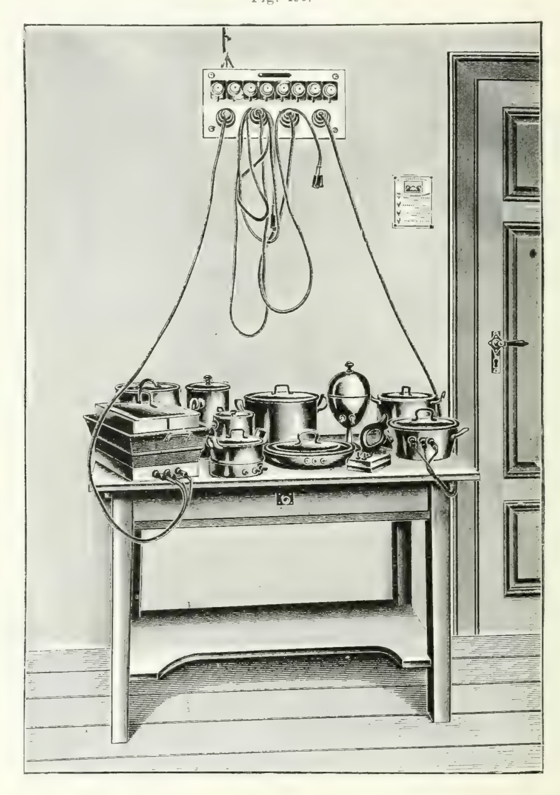
Um einen Anhalt über die Leistungsfähigkeit und den Stromverbrauch dieser Apparate zu erhalten, sei angeführt, daß eine Bratpfanne Ströme von 4, 8, 12 Ampere erhält, je nach der Schaltung, wobei immer eine Spannung von 100 Volt angenommen ist; ein Teekessel, mit 5, 4 oder 1 Ampere betrieben, bringt bei der größten Stromstärke 1 Liter Wasser in 15 Minuten zum Sieden; bei dem Inhalationsapparat, der 2 Ampere braucht, siedet das Wasser in 5 Minuten; ein Bratrost, mit 6 Ampere betrieben, ist in 5 Minuten zum Braten fertig, ebenso ist der Brennscherenwärmer, der 1 Ampere Strom braucht, in 5 Minuten zum Gebrauch fertig.

Wie einfach und appetitlich eine elektrische Küche aussieht, zeigt die Fig. 490, in der eine große Anzahl elektrischer Kochapparate auf einem Tisch gleichzeitig betrieben werden, ohne daß Feuer, Dampf, Ruß u. s. w. dabei die Arbeit der Kochkünstlerin irgendwie beeinträchtigt.

Außer für solche Kochzwecke läßt sich aber die Joulesche Wärme auch zum Heizen von Zimmern oder Trambahnwagen verwenden. Zu dem Zweck werden die Heizkörper in die Form von Öfen gebracht, an denen

sich die Luft des Zimmers erwärmen kann. So zeigt Fig. 491 einen elektrischen Ofen, der transportabel ist und in jedem Zimmer durch eine Leitungsschnur mit der elektrischen Leitung verbunden werden kann.

Fig. 490.



Die Regulierung auf verschiedene Stromstärken, also verschiedene Erwärmung, geschieht hier durch Drehung des vorn oben sichtbaren Kontaktrades, welches die betreffenden Schaltungen vornimmt. Ein solcher Ofen wird in 5 Abstufungen mit 10 bis 50 Ampere (bei 100 Volt) betrieben und genügt zum Heizen eines Raumes bis zu 100 Kubikmeter Inhalt. Allgemein kann man rechnen, daß man, um einen Raum um 10° zu erwärmen, pro Kubikmeter etwa 37 Watt nötig hat. Bei den Öfen dieser Form geschieht die Erwärmung hauptsächlich durch die Zirkulation der Zimmerluft durch den Ofen hindurch. Die kalte Luft dringt

von unten in den Ofen hinein, die warme strömt oben ab. Wo es nicht auf elegante Formen ankommt, kann man auch einfache Heizregister anwenden, wie Fig. 492 eines zeigt. Die Drähte sind dabei einfach auf feuerfeste Masse aufgewunden, ein Mantel ist nicht angebracht. Man kann beliebig viele solche Register zusammenstellen. Man kann aber den Öfen natürlich leicht auch sehr geschmackvolle Formen geben.

Fig. 491.

Besonders vorteilhaft erweist sich die elektrische Heizung für Schaufenster, um im Winter die Eisbildung an diesen zu verhindern. Andere Heizapparate kann man wegen der Feuersgefahr dabei nur in Ausnahmsfällen anbringen. Die elektrischen Schaufensterwärmer, von denen Fig. 493 einen (der A.E.G.) zeigt, werden niedrig ausgeführt und brauchen etwa 330 Watt zu ihrem Betriebe.

Ein wesentlich anderes System der elektrischen Heizung, das eine große Reihe von Vorzügen besitzt und in vielen Fällen anwendbar ist, wo andere versagen, ist das sogenannte Kryptolheizsystem. Kryptol ist der Fabrikname eines körnigen Pulvers, das aus reinem Kohlenstoff und gewissen Halbleitern, Karborund, Silikaten, Glas, wolframsauren Salzen u. dergl. besteht. Diese Masse wird zuerst zusammengepreßt und dann zu kugelförmigen oder linsenförmigen Körnern von 0,5 bis 1,5 mm Durchmesser zermahlen. Es kommt als solches Pulver (von der Gesellschaft Kryptol in Bremen) in Dosen oder Säckchen in den Handel. Wenn man solches Pulver zwischen zwei Elektroden auf eine Platte schüttet und den Elektroden eine Spannung von 100 Volt gibt, so bilden sich rasch zuerst zwischen den Kohlen kleine Lichtbogen, die Masse wird warm, die zuerst schlecht leitenden Substanzen, wie Glas und Salze, werden durch die entstehende höhere Temperatur selbst gut leitend und in kurzer Zeit wird die ganze

Fig. 492.

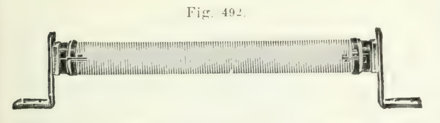
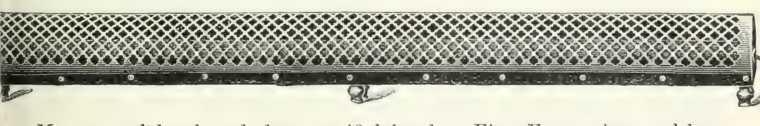


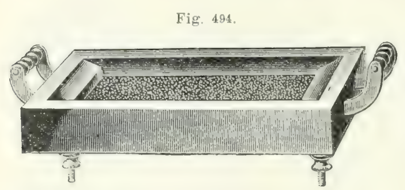
Fig. 493.



Masse rotglühend und dann weißglühend. Eine Form einer solchen Heizplatte zeigt Fig. 494. Sie besteht aus einer eisernen mit Schamotte ausgekleideten Wanne, in welche das Pulver in einer Schicht von 5 bis 10 mm Höhe geschüttet wird. Man kann dabei leicht Temperaturen bis 1500° erreichen und könnte noch bedeutend höher kommen, wenn nicht bei so hohen Temperaturen die meisten Unterlagekörper schmelzen oder weich

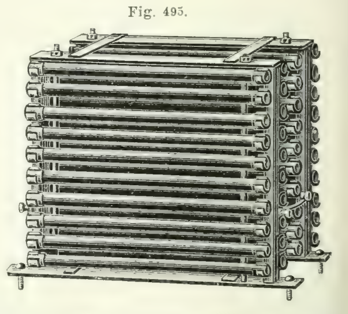
würden. Die offenen Kryptolheizbäder, die so hohe Temperaturen erreichen lassen und die bequem in der Handhabung sind, sind natürlich für eine große Reihe von Anwendungen in den chemischen Laboratorien, in verschiedenen Industrieen, wie Uhrenfabriken, Druckereien, Goldschmieden u. s. w. ausgezeichnet geeignet und haben hier der elektrischen Heizung ein Feld erobert, das sie bisher nicht besaß. Dabei kann man auch bei einer solchen offenen Kryptolschicht einzelnen Stellen des Bades eine höhere Temperatur als den anderen erteilen, indem man dort die Dicke der Kryptolschicht geringer macht. Man kann das Pulver eben durch Glasstäbe oder dergl. umrühren, ausbreiten und verschieben, während der Strom hindurchgeht. Bei sehr hohen Temperaturen verbindet sich allerdings der Kohlenstoff mit dem Sauerstoff der Luft und das Pulver verbrennt, so daß man nach einiger Zeit, wenn auch erst nach Stunden, neues Pulver nehmen muß.

Fig. 494.



Um dasselbe System auch für die Zimmerheizung anzuwenden, braucht man natürlich die Masse nur auf viel weniger hohe Temperaturen zu erhitzen. Da das Umgehen mit offenem heißem Kryptol nicht jedermanns Sache ist, so hat die Kryptol-Gesellschaft eine einfache, aber sehr praktische Änderung des Verfahrens ausgebildet. Sie bringt nämlich sogenannte Kryptolpatronen in den Verkehr. Das sind Röhren aus Glas oder Schamotte, welche mit Kryptol in bestimmter Menge gefüllt sind. Die Enden der Röhren sind durch Metallkapseln luftdicht verschlossen. Diese Patronen werden in verschiedenen Normalgrößen von 180 bis 500 mm Länge hergestellt und eine Reihe solcher Patronen wird in einem Ofen parallel geschaltet, indem die Metallenden in Federn eingesetzt werden, die mit den Elektroden verbunden sind. Fig. 495 zeigt ein solches System von Kryptolpatronen, das dann in einen Ofen eingesetzt wird. Bei 110 Volt braucht eine solche Patrone von 320 mm Länge einen Strom von 0,3 bis 0,4 Ampere, um bis 100 ^{0} erhitzt zu werden. Dieses Kryptolpatronensystem läßt sich natürlich allen Zwecken anpassen. Man kann flache und hohe Öfen konstruieren, man kann auch die Kryptolpatronen in einzelne Apparate, wie Trockenschränke etc., einsetzen, und ist so des Arbeitens mit offenem Kryptol überhoben.

Fig. 495.



Wenn es sich um rasch hervorzubringende hohe Temperaturen handelt, hat man schon früher zuweilen mit Vorteil den elektrischen Lichtbogen

selbst angewendet. Ein zweckmäßiger derartiger Apparat ist der Lötkolben mit Lichtbogenheizung, den die A.E.G. in Berlin konstruiert und der in Fig. 496 in der Ansicht, in Fig. 497 im Durchschnitt gezeichnet ist. Durch eine Leitungsschnur mit Stöpsel wird dem Apparat Strom aus einer Leitung von 65 oder 110 Volt zugeführt. Der Kupferkolben d, der direkt zum Löten dient, bildet den positiven Pol, die Kohle a den negativen Pol. Durch einen Druck auf den Knopf c bringt man die Kohle mit dem Kupferpol in Berührung. Beim Loslassen des Knopfes springt dieser und mit ihm die Kohle infolge der Spannung der Feder e um zirka 1 mm zurück und es bildet sich der Lichtbogen, der das positive Kupfer rasch und stark erhitzt. Durch ein kleines Loch bei f kann man den Lichtbogen beobachten. Ist die Kohle zu weit abgebrannt, so daß der Lichtbogen erlischt, so kann man ihn durch einen erneuten Druck auf den Knopf c wieder herstellen, was zirka jede halbe Stunde erforderlich ist. In ähnlicher Weise wendet man den Lichtbogen auch für elektrische Bügeleisen an.

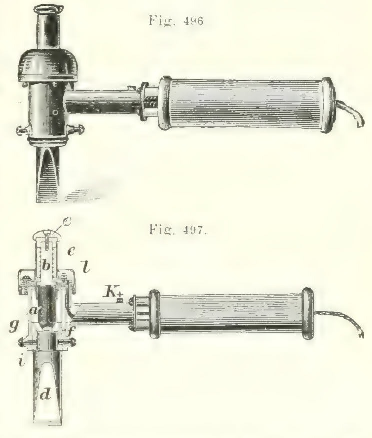


Fig. 496

Fig. 497.

Die durch den elektrischen Strom leicht erzielte Erhitzung von Metallen wird jetzt auch vielfach zum Zusammenschweißen von Metallen, von Blechen etc. benutzt. Dabei kann man entweder die Metalle durch den Strom selbst erhitzen, also die sogenannte Widerstandsschweißung anwenden, wobei die in den Schweißstücken entwickelte Joulesche Wärme die Erhitzung besorgt und die erhitzten Metallstücke dann durch Druck aneinandergeschweißt werden. Für diesen Zweck eignet sich besonders gut der Wechselstrom, der durch einen geeigneten Transformator auf geringe Spannung und hohe Stromstärke transformiert wird, wie es bei den elektrischen Schweißmaschinen von Helberger in München geschieht. Oder man kann die sogenannte Lichtbogenschweißung benutzen, bei der zwischen dem Schweißstück und einer davon getrennten Elektrode ein Lichtbogen gebildet wird, der das Schweißstück auf die hohe Temperatur bringt. Die zu diesen Verfahren geeigneten besonderen Dynamomaschinen und Apparate werden namentlich von der A.E.G. gefertigt.

Der elektrische Lichtbogen wird auch zum Betriebe elektrischer Öfen, aber nicht elektrischer Heizöfen, sondern elektrischer Schmelzöfen, benutzt und hat dafür sogar ganz besondere, sonst unerreichbare Eigenschaften. Da jedoch diese elekrischen Öfen bisher fast allein für chemische Zwecke verwendet werden, so wollen wir diese erst im Kap. 11, welches von der Elektrochemie handelt, besprechen.

---

7. Kapitel.

Die Arbeitsleistung durch Elektromotoren.

Die Anwendung der elektrischen Ströme zur Beleuchtung, so wertvoll sie ist, ist doch im wesentlichen nur eine Befriedigung des Bedürfnisses der modernen Menschen nach mehr Komfort und Bequemlichkeit. Weit tiefer dringt in das Leben, in den Beruf und in die Arbeit des einzelnen ein diejenige Anwendung der Elektrizität, welche sie befähigt, direkt mechanische Arbeit zu leisten. Von dieser Anwendung der Elektrizität ist die Industrie, das Handwerk und auch die Landwirtschaft auf das tiefste beeinflußt, und diese Faktoren sind es ja, auf welchen in der Hauptsache die Existenz des einzelnen wie des Staates beruht.

Eine jede Gleichstrommaschine läßt sich in doppelter Weise verwenden. Wenn man den Anker derselben durch Aufwendung von Arbeit vor den Magnetpolen dreht, so erzeugt man in ihm Induktionsströme, und dies ist die ursprüngliche Verwendung der Maschinen. Wenn man aber andererseits durch die Bürsten in die Drahtwindungen der Maschine irgend einen elektrischen Strom schickt, so üben ja die Magnete auf den Strom im Anker Kräfte aus, und unter dem Einfluß dieser Kräfte müssen sich die Stromleiter, d. h. der Anker, bewegen und zwar nach der Linken-Hand-Regel S. 182. Wenn man also einen Strom von außen durch die Drahtwindungen des Ankers und der Magnete sendet, so muß der Anker sich drehen.

Man hatte schon lange versucht, diese elektromagnetischen Kräfte zur Leistung von Arbeit zu benutzen. Jacobi in Petersburg brachte eine solche, wie man sie damals nannte, „elektromagnetische Maschine" (d. h. eine Maschine zur Erzeugung von Bewegung durch elektrische Ströme) in ein Boot, dessen Rad er mit der Achse des rotierenden Ankers in Verbindung gesetzt hatte, und ließ nun die Maschine durch eine große galvanische Batterie treiben. Die Maschine bewegte sich natürlich und trieb das Boot auf der Newa mit mäßiger Geschwindigkeit. Aber es war klar, daß eine solche Anwendung der Elektrizität zur Leistung von Arbeit nicht vorteilhaft sein konnte, denn es mußte ja in den Batterieen Zink verbrannt werden, und wir haben auf S. 422 gesehen, daß die Erzeugung elektrischer Energie, von welcher ja die nutzbare Arbeit abhängt, durch Verbrennung von Zink etwa 15mal so viel Kosten verursacht, als durch Verbrennung von Kohlen. Es ist also bei weitem vorzuziehen, ein Boot durch Dampf treiben zu lassen, als durch Elektrizität, wenn man diese durch Oxydation von Zink erzeugen muß.

Ganz anders aber stellt sich die Angelegenheit, wenn man starke elektrische Ströme billig zur Verfügung hat, sei es direkt aus Dynamomaschinen oder indirekt aus geladenen Akkumulatoren. Mit solchen

Strömen ist es sehr wohl möglich, ökonomisch und in sehr bequemer Form Arbeit zu leisten.

Wenn man also in eine Gleichstrommaschine von außen her einen elektrischen Strom einführt, so kommt ihr Anker in Drehung und kann Arbeit leisten. Woher man den Strom nimmt, den man in sie einleitet, ist ganz gleichgültig. Man kann ihn direkt aus einer Dynamomaschine nehmen; man kann den Strom aber auch aus Akkumulatoren oder aus galvanischen Elementen nehmen, wenn es die Ökonomie erlaubt und sonstige Rücksichten erfordern, oder man kann ihn endlich bei Stromverteilung durch Zentralstationen (s. Kap. 9) direkt aus der Leitung entnehmen. Das wesentlich Arbeitleistende ist also der elektrische Strom, und das Mittel, durch welches seine Energie in mechanische Arbeit verwandelt wird, ist die Dynamomaschine, die man deshalb auch als elektrischen Motor oder Elektromotor bezeichnet.

Ein elektrischer Motor, welcher durch einen Strom getrieben wird, kann also Arbeit leisten. Wenn man seine Achse durch Riemen oder Zahnräder oder auf irgend eine andere Weise mit der Welle einer Maschine in Verbindung setzt, die man treiben lassen will, so wird diese gedreht, und auf diese Weise leistet der Elektromotor Arbeit. Er tut es dadurch, daß ihm von der Elektrizitätsquelle elektrische Energie zugeführt wird.

Wie aus dem Gesagten hervorgeht, unterscheiden sich die Gleichstrommotoren in nichts von den Gleichstromdynamos zur Erzeugung von Strömen. Je nachdem man eine solche Gleichstrommaschine durch äußere Kraft oder durch einen eingeleiteten Strom dreht, erzeugt sie im ersten Fall Ströme, im zweiten Fall Arbeit. Wir können, um diese Umkehrbarkeit schärfer auszusprechen, dies auch so fassen: Eine Dynamomaschine verwandelt mechanische Energie in elektrische oder elektrische Energie in mechanische. Leitet man mechanische Energie in sie hinein, so gibt sie elektrische Energie heraus, leitet man elektrische Energie in sie hinein, so gibt sie mechanische Energie heraus.

In der Konstruktion besteht kein Unterschied zwischen Dynamos (Generatoren) und Motoren für Gleichstrom und daher sind alle die einzelnen Typen von Gleichstromdynamos, die wir auf S. 395 bis S. 399 beschrieben haben, ebenso als Motoren wie als Generatoren zu benutzen. Wir werden im folgenden bei den Einzelmaschinen solche Gleichstrommotoren abgebildet sehen, brauchen sie also hier nicht darzustellen.

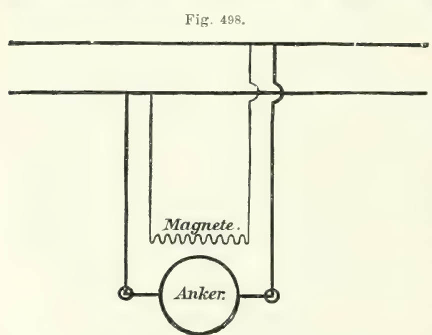
Wenn ein elektrischer Strom von den Bürsten aus in einen solchen Motor gesendet wird, so kommt der Anker in Drehung. Durch diese Drehung entsteht aber in dem Anker (dem Ring oder der Trommel) eine elektromotorische Kraft, welche für sich selbst einen Strom in entgegengesetzter Richtung nach außen senden würde, wie aus dem Lenzschen Gesetz (S. 214) sich ergibt. Die äußere elektromotorische Kraft, die den Strom in die Maschine sendet, muß also größer sein als diese gegenwirkende elektromotorische Kraft. Die gesamte Energie, welche der Motor pro Sekunde aufnimmt, ist nun, wie immer, gleich dem Produkt aus der Stromstärke und der Klemmenspannung an seinen Enden. Diese Energie verbraucht er zum Teil in sich, nämlich für Reibung und Joulesche Wärme,

also als sogenannte Leerlaufsarbeit, zum anderen Teil kann er sie an äußere Maschinerieen als Arbeit abgeben. Er kann also eine Arbeit leisten, die, bis auf diese Leerlaufsarbeit, gleich dem Produkt aus seiner Klemmenspannung, seiner Stromstärke und seiner Umdrehungsgeschwindigkeit, also seiner Tourenzahl pro Sekunde ist. Wenn er immer dieselbe Arbeit leisten soll, so muß dieses Produkt immer gleich sein; soll er eine größere oder eine geringere Arbeit leisten, so muß dieses Produkt größer oder kleiner werden. Die Motoren werden nun entweder so benutzt, und das ist bisher der häufigste Fall, daß sie an die Leitung eines elektrischen Netzes, welches von einer Zentralstation auf gleicher Spannung erhalten wird, angeschlossen werden, oder sie werden in besonderen Kraftübertragungsanlagen benutzt. Diesen letzteren Fall werden wir im folgenden Kapitel besonders besprechen. Hier wollen wir also annehmen, daß die Elektromotoren an Leitungen angeschlossen sind, bei denen die Klemmenspannung stets konstant erhalten wird.

Die elektrischen Motoren, welche durch Gleichströme getrieben werden, können natürlich ebenfalls wie die stromerzeugenden Gleichstrommaschinen in dreifach verschiedener Schaltung ausgeführt werden, nämlich als Hauptstrommotoren, Nebenschlußmotoren und Motoren mit gemischter Schaltung. Die letzteren werden aber fast gar nicht verwendet.

Am vorteilhaftesten hat sich für Arbeitsleistungen bei konstanter Klemmenspannung der Nebenschlußmotor erwiesen. Wenn ein solcher an die beiden Leitungen angelegt wird, zwischen denen die gegebene Spannungsdifferenz herrscht, so ist, wie Fig. 498 zeigt, sowohl der Anker, als die Magnetbewicklung mit diesen Leitungen verbunden. Daraus folgt zunächst, daß in der Magnetbewicklung immer ein Strom von derselben Stärke fließt, wie groß oder wie klein auch die Umdrehungsgeschwindigkeit des Ankers sein möge. Also ist das Magnetfeld des Motors dauernd dasselbe. Die elektromotorische Gegenkraft, die der Motor erzeugt, ist nun abhängig, wie immer bei Induktionsströmen, von der Stärke des Magnetfeldes, der Windungszahl auf dem Anker und der Geschwindigkeit (Tourenzahl) desselben. Und da die elektromotorische Gegenkraft stets, bis auf den Spannungsverlust im Inneren des Motors, so hoch wird, wie die äußere Spannung, welche ihn treibt, so sieht man, daß der Motor immer nahezu dieselbe Tourenzahl behalten muß, ob er nun mit Belastung oder ohne dieselbe, also leer, läuft. Denn da die Spannung, die Windungszahl und das Magnetfeld ungeändert bleiben, so muß auch die Tourenzahl dieselbe bleiben. Das Resultat ist also, daß bei

Fig. 498.

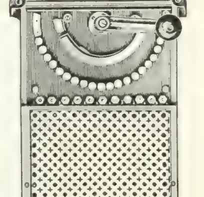


verschiedenen Belastungen, bei verschieden großen Arbeiten, die der Nebenschlußmotor zu leisten hat, die Tourenzahl nahe immer dieselbe bleibt, solange das Magnetfeld nicht geändert wird, und daß nur der Anker je nach der geleisteten Arbeit von verschieden starken Strömen durchflossen wird, von um so stärkeren, je größer die geleistete Arbeit ist. Daraus folgt zunächst die erfreuliche Tatsache, daß der Motor, bis auf die Leerlaufsarbeit, immer gerade so viel Energie von außen, von der Leitung aufnimmt, als er Arbeit leistet. Bei halber Arbeit nimmt er bloß die halbe Energie auf, wenn die Leerlaufsarbeit zunächst unberücksichtigt bleibt. Erfreulich ist diese Tatsache, weil die aufgenommene Arbeit sich ja zuletzt in den Kosten der Kohlen ausdrückt, welche zu ihrer Erzeugung benutzt werden.

Damit nun der Motor recht große Kraft, namentlich beim Einschalten, also beim Anlauf, entwickle, auch wenn er belastet ist, also wenn eine Arbeitsmaschine an ihm hängt, ist es notwendig, sein Magnetfeld recht stark zu machen und den Widerstand des Ankers möglichst klein zu halten, damit die in ihm erzeugten Ströme recht stark werden.

Wenn aber die Elektromotoren einen sehr kleinen Ankerwiderstand haben, so treten bei dem Anschluß derselben an die Stromleitungen zunächst Übelstände auf. Nehmen wir an, ein solcher Motor habe den Widerstand von 1 Ohm und er werde zwischen zwei Leiter geschaltet, die 100 Volt Spannungsdifferenz haben, so würde im ersten Moment ein Strom von 100 Ampere durch die Drahtwindungen fließen. Der Anker würde sich zwar sofort in Bewegung setzen und dadurch einen Gegenstrom erzeugen, der die 100 Ampere bald auf 50, 20 u. s. w. Ampere hinunterbringen würde, aber es würde gewöhnlich gar nicht dazu kommen; denn durch den ersten momentanen starken Strom würden die Drähte des Ankers und ihre Isolierung beschädigt werden oder mindestens würde die Sicherung (oben S. 510) durchschmelzen. Und selbst wenn das nicht der Fall wäre, wenn alle Maße so genommen werden, daß das nicht eintreten würde, so würde doch durch die plötzliche starke Stromentnahme aus dem Netz dieses in Störung geraten, die Spannung würde plötzlich sinken. Diese Umstände verlangen, daß die Elektromotoren, und namentlich die größeren, nicht auf einmal, sondern allmählich in den Stromkreis eingeschaltet werden. Dazu braucht es zunächst weiter nichts, als einen Vorschaltwiderstand, so daß der Strom erst durch einen großen Widerstand geht und dadurch schwach wird; wenn der Anker sich dann dreht und Gegenstrom erzeugt, dann wird der Widerstand allmählich verringert und schließlich kurz geschlossen, so daß der Motor allein im Stromkreis ist. Ein solcher Anlasser ist z. B. durch Fig. 499 dargestellt. Dabei werden bei größeren Motoren zuerst die Magnete eingeschaltet und dann allmählich der Anker.

Fig. 499.

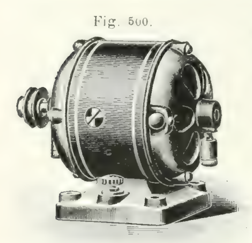


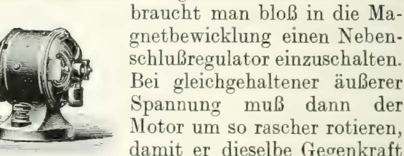
Die kleineren Motoren, von $^1/_{100}$ bis zu 2 Pferdekräften Leistung, werden jetzt von den großen elektrischen Gesellschaften in sehr erheblichen Mengen hergestellt, wodurch ihr Preis auch ein sehr geringer ist. Die

äußere Form dieser Kleinmotoren ist bei allen Fabriken eine ähnliche geworden. Der drehbare Anker wird meistens durch ein Gehäuse vor Verunreinigung geschützt. Fig. 500 zeigt solche Motoren für $^1/_{100}$ und $^1/_6$ Pferdekraft, im Verhältnis von 1 : 7 verkleinert.

Während so der Nebenschlußmotor bei jeder Leistung dieselbe Tourenzahl besitzt — eine Eigenschaft, die bei vielen Betrieben sehr geschätzt, ja notwendig ist —, ist es natürlich andererseits auch möglich, die Tourenzahl des Motors zu ändern, und zwar dadurch, daß man eben die Stärke des Magnetfeldes ändert. Dazu braucht man bloß in die Magnetbewicklung einen Nebenschlußregulator einzuschalten. Bei gleichgehaltener äußerer Spannung muß dann der Motor um so rascher rotieren, damit er dieselbe Gegenkraft erzeuge, je schwächer das Magnetfeld ist. Einschalten von Widerstand in die Magnetbewicklung erhöht also die Tourenzahl des Motors.

Fig. 500.





Wenn man dagegen einen Hauptstrommotor an zwei Leitungen von gegebener Spannungsdifferenz anlegt, so ist die Stärke des Magnetfeldes nicht immer dieselbe, sondern wenn der Motor von einem stärkeren Strom durchflossen wird, ist auch das Magnetfeld stärker, und umgekehrt bei schwächerem Strom im Anker ist auch das Magnetfeld schwächer. Denn Anker und Magnetbewicklung werden dabei immer von demselben Strom durchflossen. Daraus folgt, daß ein solcher Motor nicht immer dieselbe Tourenzahl behalten kann. Hat er große Arbeit zu leisten, so ist sein Strom im Anker stark, daher auch das Magnetfeld stark und er läuft daher langsam. Hat er wenig Arbeit zu leisten, so läuft er rasch. Bei elektrischen Straßenbahnen benutzt man gewöhnlich Hauptstrommotoren. Diese gehen daher von selbst, ohne daß man irgendwie reguliert, auf Kurven und bei Steigungen langsamer als auf gerader Straße. Weiter aber folgt aus der Veränderlichkeit des Magnetfeldes, daß die Anzugskraft des Hauptstrommotors eine bedeutend größere ist, als die eines Nebenschlußmotors. Denn wenn der Hauptstrommotor mit starker Belastung plötzlich an die Spannung angelegt wird, so wird im ersten Moment der Strom im Anker und in der Magnetbewicklung sehr stark, so daß die Kraft, mit welcher der Anker sich dreht, eine sehr große ist, die auch die große Belastung leicht überwinden kann. Deshalb werden gerade bei elektrischen Trambahnen und Automobilen Hauptstrommotoren vorzugsweise angewendet.

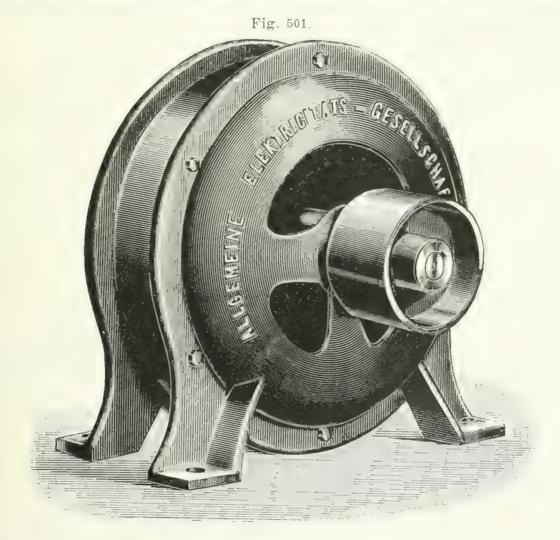
Ebenso einfach wie durch Gleichstrom kann man aber auch durch Drehströme Arbeit leisten lassen, während gewöhnliche Wechselströme zunächst, ohne besondere Einrichtungen, dazu nicht zu verwenden sind.

Es war eine höchst bedeutsame Erfindung, als durch Ferraris und Tesla gezeigt wurde, daß man zwei oder mehr Wechselströme mit verschiedener Phase, also die Mehrphasenströme, speziell die Dreh-

ströme, in sehr einfacher Weise zur Erzeugung von mechanischer Arbeit aus elektrischer Energie verwenden könne. Von allgemeiner Bedeutung wurde diese Methode erst, seit (1891) die Allgemeine Elektrizitäts-Gesellschaft in Berlin und die Maschinenfabrik Oerlikon Motoren nach diesem System bauten und ihnen den bezeichnenden Namen Drehstrommotoren gaben. Seit dieser Zeit werden derartige Motoren von vielen Fabriken in verschiedener Ausführung gebaut.

Das Prinzip derselben ist folgendes: Die von einer primären Drehstrommaschine (S. 411) herkommenden drei Wechselströme verschiedener Phase werden in drei Gruppen um einen festen Eisenring geführt, so zwar, daß der erste Wechselstrom zwei diametral einander gegenüberliegende Spulensysteme durchläuft, der zweite zwei andere ebensolche, die um 60° von den ersten abstehen, der dritte zwei weitere, die wieder um 60° von diesen abstehen. Nach dem früher (S. 266) Gesagten wird dann innerhalb des Ringes ein Magnetfeld gebildet, dessen Achse sich fortwährend verschiebt, sich innerhalb des Ringes fortwährend im Kreise herumdreht, und zwar mit derselben Periode, welche die Wechselströme haben, es entsteht ein sogenanntes magnetisches Drehfeld. Im Innern des festen Ringes befindet sich nun ein eiserner Anker, der Drahtwindungen

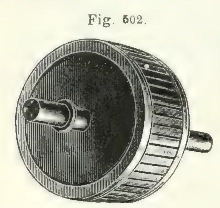
Fig. 501.



trägt, die einfach in sich geschlossen sind. Dieser Anker kann als Ringanker gewickelt sein, ist aber meistenteils als Trommelanker gewickelt. In den Drahtwindungen entstehen nun durch die Induktion von den vorbeilaufenden Polen Induktionsströme und durch die Wechselwirkung zwischen den Polen und den Strömen fängt der Anker an, sich zu drehen. Der

Anker würde auch rotieren, wenn er keine Drahtwindungen besäße, wegen der Anziehung zwischen den Polen und den Foucaultschen Strömen. Man zieht aber vor, den Anker mit Drahtwindungen zu versehen (es können auch Kupferstäbe direkt in das Eisen hineingelegt werden), um den Induktionsströmen, die im Kupfer natürlich viel stärker sind als im Eisen, vorgeschriebene und zwar die günstigsten Bahnen zu geben. Ein solcher Motor enthält also gar keinen Kollektor, wie die Gleichstrommotoren, und ist aus diesem Grunde sehr viel vorteilhafter als diese. Fig. 501 gibt eine Abbildung eines Drehstrommotors der A.E.G. Man sieht das Eisengehäuse, an welchem innen die Wicklungen für den zugeführten Drehstrom angebracht sind. In Fig. 502 sieht man den Anker besonders abgebildet, eine Reihe von Kupferstäben auf einem Zylinder, durch zwei Metallringe verbunden. Einen solchen Anker bezeichnet man als K u r z s c h l u ß a n k e r.

Fig. 502.



Der bewegliche Teil, der Anker mit seinen Windungen, braucht also gar keinen Kollektor, keine Schleifringe, keine Bürsten, wie bei den Gleichstrommotoren, sondern die Ströme im beweglichen Teil werden direkt von denen im festen Teil induziert. Die Achse des Ankers wird in gewöhnlicher Weise mit den Arbeitsmaschinen verbunden und durch dessen Rotation sind sie imstande, Arbeit zu leisten. Sie sind daher die einfachsten Motoren, die man sich denken kann, einfacher selbst als die Gleichstrommotoren. Da die Ströme im Anker nur durch Induktion entstehen, nicht zugeleitet werden, so bezeichnet man diese Motoren allgemein als I n d u k t i o n s m o t o r e n.

Wenn der Anker keine äußere Arbeit zu leisten hat, so rotiert er immer rascher, bis er nahezu dieselbe Geschwindigkeit hat wie die Pole selbst, die im festen Ring herumlaufen. Würde er diese Geschwindigkeit ganz erreichen, so würden aber keine Ströme mehr induziert werden, weil keine relative Bewegung zwischen den Polen und den Stromleitern existieren würde. Sowie aber aus irgend einem Grunde die Geschwindigkeit des Ankers nachläßt, werden Ströme induziert. Wird nun der Motor belastet, d. h. wird seine Achse mit einer Maschine verbunden, bei der er Arbeit zu leisten hat, so wird seine Geschwindigkeit kleiner und nun leistet er die Arbeit. Diese Änderung der Geschwindigkeit zwischen Leerlauf und Belastung ist aber bei gut gebauten Maschinen sehr gering. Sie beträgt höchstens 10 Proz. Es werden eben schon bei geringem Unterschied in den Geschwindigkeiten starke Kräfte zwischen den Polen und den Strömen erzeugt. Dieser geringe Unterschied zwischen der Geschwindigkeit beim Leerlauf und bei voller Belastung bewirkt natürlich, daß ein Drehstrommotor immer nahezu dieselbe Geschwindigkeit hat, wie die Pole, die im festen Ring herumlaufen. Aber eben nur nahezu. Der Motor kann prinzipiell an Geschwindigkeit hinter dieser beliebig zurückbleiben; es braucht keine Gleichzeitigkeit, kein Synchronismus zwischen der Bewegung der Dynamomaschine und der des Motors zu herrschen, er ist also ein a s y n c h r o n e r Motor. Daß er nur wenig zurückbleibt, liegt eben daran, daß er dann schon die genügende Arbeit leistet. Den Unterschied der Geschwindigkeit des Ankers gegenüber der Geschwin-

digkeit, mit der die Pole im Gehäuse umlaufen, bezeichnet man als die Schlüpfung des Motors.

Ein solcher Motor wird, wie Fig. 503 zeigt, direkt an die drei Leitungen angelegt, die von der Drehstromdynamomaschine kommen, unter Zwischenschaltung eines Schalthebels, um den Strom ein- und ausschalten zu können.

Beim Anlaufen, wenn der Motor noch stillsteht, wird eine sehr große Stromstärke verbraucht, teils deswegen, weil der Widerstand und die Selbstinduktion der festen Wicklung klein sind, teils deswegen, weil der Strom sofort in den Ankerwicklungen die starken Induktionsströme erzeugt. Um diese starke Stromentnahme beim Anlaufen zu vermindern und doch die Zugkraft des Motors nicht zu stören, kann man nicht, wie bei Gleichströmen, in den zugeführten Strom Widerstand einschalten, weil sonst die Zugkraft des Motors aufgehoben würde. Vielmehr schaltet man dann in die Ankerwicklung Widerstand und zwar induktionsfreien Widerstand (S. 248) ein. Um das aber tun zu können, muß man die Ankerwicklung doch wieder zu Schleifringen auf der Achse führen, an welchen man Bürsten schleifen läßt. Aus diesem Grunde werden größere Drehstrommotoren nicht mit Kurzschlußanker, sondern mit einem Anker mit drei Schleifringen an der Achse und

Fig. 503.

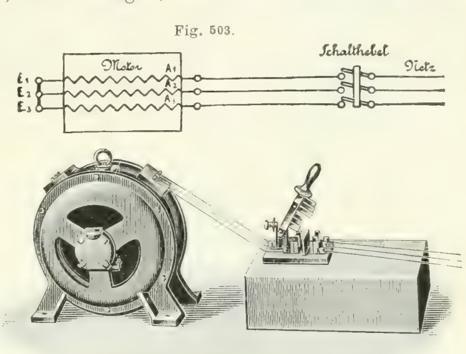
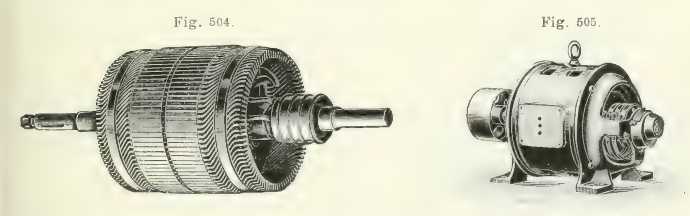


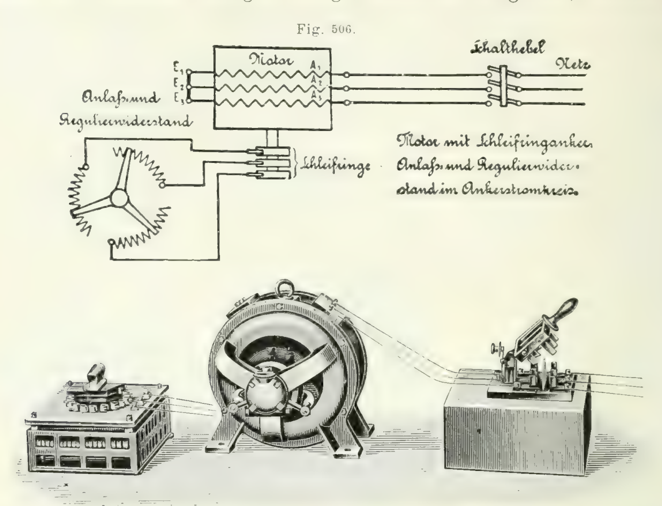
Fig. 504. Fig. 505.



einem Anlaßwiderstand für den Anker ausgeführt. Fig. 504 zeigt einen solchen Anker mit Schleifringen. Fig. 505 gibt die Ansicht eines solchen Drehstrommotors mit Schleifringen von den Bergmann-Elektrizitätswerken. In Fig. 506 ist die Verbindung eines solchen Motors mit dem Netz dargestellt. Von dem Netz wird der Strom wie vorher durch einen dreiteiligen Schalthebel in die feste Wicklung des Motors eingeführt. Der Anker aber, dessen Drähte in drei Teile zusammengefaßt sind, trägt die drei Schleifringe und diese sind mit dem dreiteiligen

Rheostaten links verbunden, auf welchem ein dreiteiliger Hebel, wenn er sich im Sinne des Uhrzeigers bewegt, allmählich den großen, zunächst

Fig. 506.



eingeschalteten Widerstand ausschaltet, bis zuletzt der Anker kurz geschlossen ist.

Das Anlassen von Drehstrommotoren kann man aber noch auf andere Weise erreichen, die von den Siemens-Schuckertwerken benutzt wird. Man kann nämlich die einzelnen Drähte des Ankers, die ja induziert werden, während des Anlaufs gegeneinander schalten, so daß der gesamte Strom in dem Anker gering ist, wodurch dasselbe erreicht wird, wie durch Einführung von Widerstand in den Anker. Ein solcher Motor läuft mit Kraft an. Sobald er eine gewisse Geschwindigkeit erreicht hat,

Fig. 507.

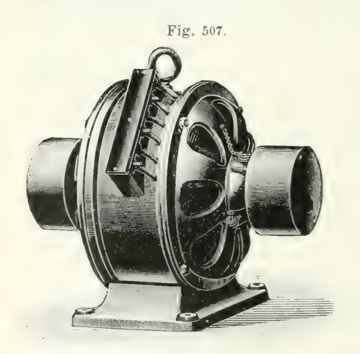
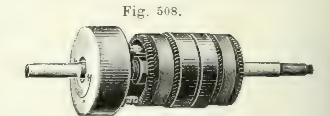


Fig. 508.



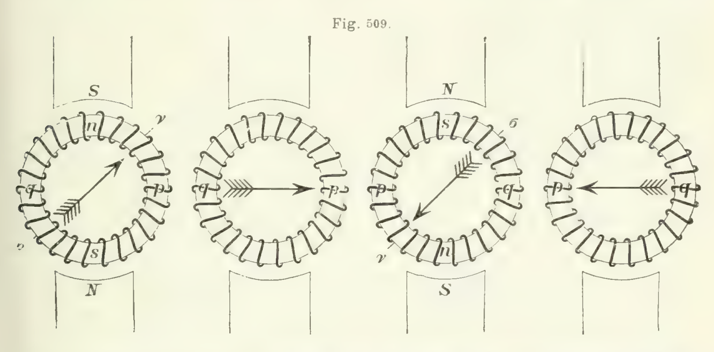
werden selbsttätig die Ankerwindungen wieder normal geschaltet. Fig. 507 zeigt einen solchen Drehstrommotor mit Gegenschaltung, Fig. 508 den Anker allein, bei welchem die normale Schaltung selbst-

tätig bei erlangter großer Geschwindigkeit vor sich geht. Derartige Motoren haben den Vorteil, daß sie keinen Anlaßwiderstand brauchen.

Selbstverständlich kann man ebenso wie mit drei Dreiphasenströmen, so auch mit zwei Zweiphasenströmen Induktionsmotoren betreiben.

Die Erfindung und praktische Durchbildung der Drehstrommotoren gab nun aber auch das Mittel an die Hand, wie man auch für gewöhnlichen (einphasigen) Wechselstrom brauchbare Motoren konstruieren könne. Diese Einphasenmotoren wirken zuerst überraschend, sind aber bei näherer Betrachtung leicht verständlich. Auch bei ihnen wird, wie bei den Drehstrommotoren, der Wechselstrom nur um einen feststehenden Ring geleitet, während der bewegliche Anker bloß Drahtwindungen oder Stäbe enthält, die in sich kurz geschlossen sind. Insofern unterscheiden sich also die Einphasenmotoren gar nicht von den Drehstrommotoren, bloß daß sie eben, wie es scheint, kein sich drehendes Magnetfeld haben. Da das nun aber gerade der Witz bei den Drehstrommotoren ist, da sie nur deswegen rotieren, weil eben bei ihnen ein Drehfeld erzeugt ist, so sieht

Fig. 509.

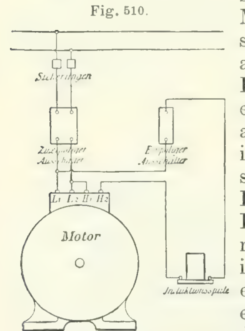


man zunächst nicht ein, wieso solche Einphasenmotoren rotieren sollen. In der Tat kommen auch solche Motoren nicht von selbst in Drehung. Wenn man ihnen aber auf irgend eine künstliche Weise zuerst eine passende Drehung gegeben hat, so rotieren sie von selbst weiter und können dabei Arbeit leisten. Wie man ihnen zunächst die Anfangsdrehung erteilt, werden wir bald besprechen. Zunächst aber interessiert uns die Frage, ob und aus welchem Grunde ein solcher Kurzschlußanker in einem einfachen Wechselfeld weiter rotiert, wenn er einmal zu rotieren begonnen hat. Der Grund dafür ist derselbe, wie für die Tatsache, daß in einem Grammeschen Ring die Indifferenzstellen, wo die Bürsten aufliegen, in der Drehrichtung verschoben sind (S. 384). Wenn ein Grammescher Eisenring mit Drahtumwicklung sich zwischen zwei Polen S und N befindet, wie in Fig. 509, und in der Richtung nach rechts gedreht wird, so wissen wir, daß durch die entstehenden Ströme nach der Ampèreschen Regel in dem Eisenring magnetische Pole entstehen würden bei p und q, während durch die direkte Wirkung der induzierenden Magnete die Pole n und s entstehen. Das Resultat dieser beiden Wirkungen ist, daß sich die

Pole bei ν und σ bilden, daß also die magnetische Achse die Richtung des Pfeiles σν hat. Wenn nun die beiden Feldmagnetpole N und S nicht von einem Gleichstrom gespeist werden, sondern von einem Wechselstrom, so wird der Südmagnetismus des oberen Pols von seinem größten Wert an allmählich abnehmen, er wird Null werden und wird dann in Nordmagnetismus übergehen, und umgekehrt wird es im unteren Pole sein. Entsprechend wird der Magnetismus des Ringes, der durch die Pole n und s gekennzeichnet ist, abnehmen, durch Null hindurchgehen und sich umkehren, aber immer in der Richtung n s oder s n wirken. Dagegen der durch die Ankerwindungen erregte Magnetismus wird immer die Richtung p q behalten und den größten Wert bekommen, wenn S und N sich gerade umkehren. In diesem Falle ist ja die Induktion immer am stärksten. Wir erhalten daher durch die Zusammensetzung dieser beiden Kräfte in dem Ring Pole, welche im Ring wandern. In der ersten Figur sind sie durch σν dargestellt, in der zweiten durch p q, wobei sich die Achse des Magneten gedreht hat. In der dritten und vierten Figur geht die Drehung weiter, und so ergibt sich ein im Eisenring umlaufender Pol, ein magnetisches Drehfeld, ganz so wie bei den Mehrphasenströmen. Daher bleibt der Anker, wenn er einmal gedreht ist, in fortlaufender Rotation, und selbst wenn er Arbeit leistet, sucht er sich fortwährend dem synchronen Gange zu nähern, ohne ihn ganz zu erreichen.

Es kommt also nur darauf an, einem solchen Einphasenmotor zu Anfang eine Rotation zu erteilen, ihn angehen zu lassen, dann bleibt er von selbst in Rotation. Das Angehen aber kann man am einfachsten so erreichen, daß man den Motor zuerst als Mehrphasenmotor benutzt. Zu dem Zweck versieht man den feststehenden Teil des Motors außer mit der Hauptwicklung noch mit einer Hilfswicklung. An diese Hilfswicklung wird außen eine Induktionsspule von großem Selbstpotential angeschaltet, so daß beim Einschalten des Motors in die Leitung diese beiden Wicklungen Wechselströme führen, die verschiedene Phasen besitzen. Denn das große Selbstpotential bringt ja eine Phasenverschiebung hervor. Dadurch kommt nun der Anker, wie bei jedem Zweiphasenmotor, in Rotation. Hat er eine genügende Rotation erreicht, so schaltet man die Hilfsspule durch einen einfachen Ausschalter aus und hat dann den Einphasenmotor. Ein Schema für diese Anordnung ist in Fig. 510 gegeben. Von den beiden Hauptleitungen für den Wechselstrom, die oben in der Figur gezeichnet sind, zweigen zwei Drähte zu dem Motor ab, die durch die Sicherungen und den Ausschalter zu den Enden L_1 und L_2 der Hauptwicklung des Motors führen. Parallel zu dem Strom in dieser Hauptwicklung zweigt sich der Strom ab, der durch einen Ausschalter und die Induktionsspule in die Enden der Hilfswicklung H_1 und H_2 geht. Sobald der Motor läuft, öffnet man den Ausschalter in dem Hilfskreis, und der Motor läuft nun von selbst weiter.

Fig. 510.



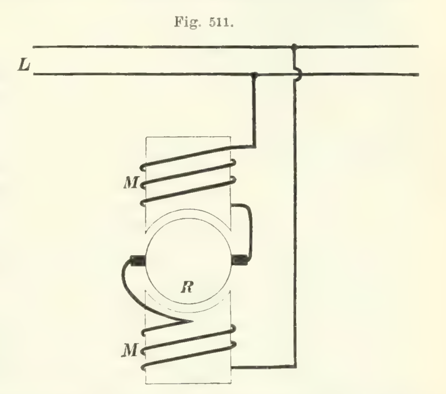
Immerhin ist der Einphasen-Induktionsmotor nur ein Notbehelf. In

Wirklichkeit nämlich geht ein solcher Einphasenmotor doch nur dann an, wenn er fast unbelastet ist. Durch die künstlichen Mittel kann man wohl eine Phasenverschiebung bei ihm hervorbringen, aber doch keine so große, daß der Motor etwa wie ein Drehstrommotor bei jeder Belastung angehen kann.

Da nun aber der reine Wechselstrom doch jedenfalls einfacher ist als der Drehstrom, schon weil er bloß zwei Leitungen gegen drei braucht, und weil namentlich für elektrische Vollbahnen (worunter man im Gegensatz zu den Straßenbahnen die großen, bisher mit Lokomotiven befahrenen Bahnen versteht) einphasiger Wechselstrom, wenn man einen guten Motor hätte, dem Drehstrom unbedingt vorzuziehen wäre, so hat die Technik immer wieder das Problem des Einphasenmotors aufgenommen und darin auch fortschreitende Erfolge erzielt.

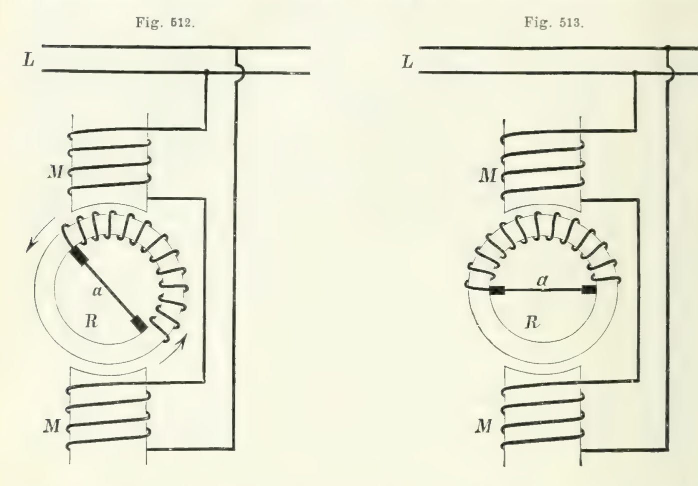
Der oben erwähnte Einphasenmotor ist ein Induktionsmotor wie der Drehstrommotor. Man kann aber eigentlich, wenigstens im Prinzip, jede gewöhnliche Gleichstrommaschine, wenn sie Hauptschaltung besitzt (Anker, Magnete und äußerer Stromkreis hintereinander geschaltet), als einen Wechselstrommotor benutzen. In Fig. 511 ist das Schema einer solchen Maschine mit den beiden Magnetschenkeln M und dem Ring R mit den Bürsten gezeichnet. Die Maschine erhält den Strom aus den beiden Leitungen L. Wenn nun diese Leitungen Wechselströme führen und diese in die Maschine hineinsenden, so geschieht folgendes. Beim Wechsel der Stromrichtung wird sowohl der Strom in den Magnetschenkeln wie im Anker umgekehrt, und daher bleibt die Drehrichtung des Ankers dieselbe. Also eine gewöhnliche Gleichstrommaschine muß, auch mit Wechselstrom betrieben, als Motor laufen. Nur wird man natürlich das Eisen der Magnete dabei unterteilen, lamellieren und wird Anordnungen anbringen müssen, um die Funken am Kommutator, die durch die Extraströme entstehen und die hier besonders stark auftreten, zu beseitigen. An der Verringerung oder Beseitigung des Feuerns dieser Motoren hängt die ganze Möglichkeit ihrer Verwendung. Es werden in neuerer Zeit tatsächlich Einphasenmotoren nach diesem Prinzip gebaut, man nennt sie einphasige Serienmotoren. Die Funkenbildung wird dabei auch wieder am besten durch Kompensationspole beseitigt, wie wir es bei den Dynamomaschinen oben S. 390 besprochen haben.

Fig. 511.

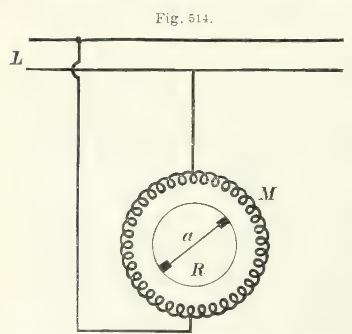


Man kann aber eine Gleichstrommaschine noch in zweiter Art als Einphasenmotor verwenden. Wenn man nämlich die Bürsten des Ankers um 45° gegen ihre richtige Stellung verschiebt und sie dann direkt durch

einen kurzen Draht verbindet, also kurz schließt, so hat man ebenfalls einen Einphasenmotor, der von selbst und zwar mit Kraft angeht. In Fig. 512 ist das Schema für diese Anordnung gezeichnet. Die Magnete M M erhalten Wechselstrom aus der Leitung L und die Bürsten des Ankers



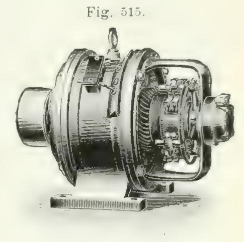
sind um 45° gegen ihre richtige Stellung gedreht und durch einen Draht a kurz geschlossen. Durch die Wechselströme in den Magneten werden die Drähte des Ringes induziert. und zwar haben die Ströme in den unter den Magnetpolen liegenden Drähten solche Richtung, daß die ganze Ringhälfte sich symmetrisch unter den betreffenden Pol zu stellen sucht. Wenn daher die Bürsten, wie in Fig. 513 normal, senkrecht zu den Polen stehen, so werden von jedem Pol alle unter ihm liegenden Stäbe gleich induziert und der Anker bleibt in Ruhe. Wenn dagegen die Bürsten schief stehen, wie in Fig. 512, so werden die Teile des Rings, die unter dem Pole stehen, induziert und der Anker dreht sich so, daß diese Windungen möglichst direkt unter die Polschuhe zu stehen kommen. Dadurch ist der Antrieb eines solchen Motors gegeben. Da die Bürsten immer an derselben Stelle bleiben, so dreht sich der Anker dauernd fort. Wechselstrommotoren dieser Art bezeichnet man als Repulsionsmotoren. Statt zwei ausgeprägte Magnetpole als



Feldmagnete zu nehmen, kann man auch das Feld durch einen Eisenmantel erzeugen, wie in Fig. 514, auf dem die Windungen rings herum gleichmäßig verteilt sind und durch die beiden Zuleitungen von der Leitung her Wechselstrom erhalten. Die beiden Windungshälften des äußeren Ringes erzeugen dann immer noch ein Magnetfeld, dessen Achse in der Figur die vertikale Richtung hat, während die Bürsten im Ring R schief dagegen stehen.

Diese beiden Arten von Einphasenmotoren, die man auch als Kollektormotoren bezeichnet, werden von den verschiedenen großen elektrotechnischen Fabriken immer mehr durchgearbeitet, weil durch sie der einfache Wechselstrom ebenso auszunützen ist, wie der Drehstrom bisher ausgenützt wurde. Fig. 515 zeigt einen kleinen Repulsionsmotor der Siemens-Schuckertwerke.

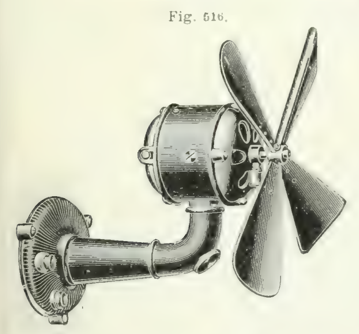
Fig. 515.



Bisher hat sich aber von allen Motoren der Drehstrommotor bei weitem als der brauchbarste für die meisten Zwecke erwiesen. Er ist nicht bloß vorteilhafter als der Einphasenmotor, sondern er ist auch in vieler Beziehung dem Gleichstrommotor überlegen, überlegen an Kleinheit, Billigkeit, bequemer Gebrauchsfähigkeit ohne Wartung, größerer Anschmiegsamkeit an die Bedürfnisse der Praxis. Der Drehstrommotor läßt sich geradezu als ein idealer Motor bezeichnen.

Die Anwendbarkeit aller elektrischen Motoren, sowohl der Gleichstrommotoren, wie auch der für Drehstrom und Wechselstrom, ist nun natürlich eine sehr ausgedehnte. Sie sind überall da zu benutzen, wo eine Elektrizitätsquelle mit konstanter Spannung zur Verfügung steht, also insbesondere da, wo die Elektrizität aus Zentralstationen in die Häuser und Werkstätten geleitet wird.

Fig. 516.

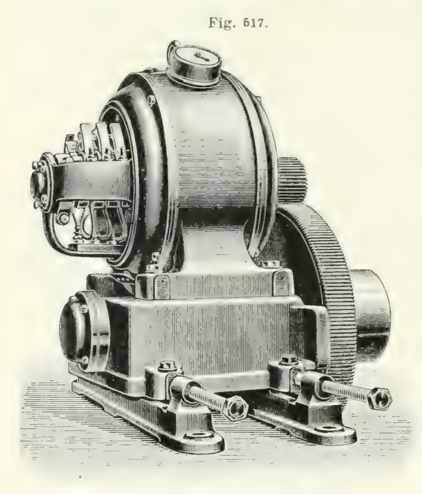


Die Elektromotoren, namentlich die kleineren, haben im allgemeinen ziemlich große Umdrehungsgeschwindigkeiten. Um nun den Elektromotor mit den Arbeitsmaschinen zu verbinden, hat man vielfache bekannte Mittel. Brauchen die Arbeitsmaschinen selbst große Geschwindigkeiten, so ist es am einfachsten, den Motor direkt auf die Achse der Arbeitsmaschine zu setzen und diese dadurch zu treiben. So werden elektrische Ventilatoren bequem so konstruiert, daß die Ventilatorflügel direkt auf die Achse des Motors aufgesetzt werden. Fig. 516 zeigt einen Konsolventilator mit Drehstrommotor der Siemens-Schuckertwerke. Mit 60 Watt, d. i. kaum 1/10 Pferdekraft, lassen sich schon Ventilatoren betreiben, die pro Stunde bis 1800 cbm Luft befördern.

Ebenso wird bei Zentrifugen der Elektromotor am bequemsten direkt auf die Achse derselben gesetzt.

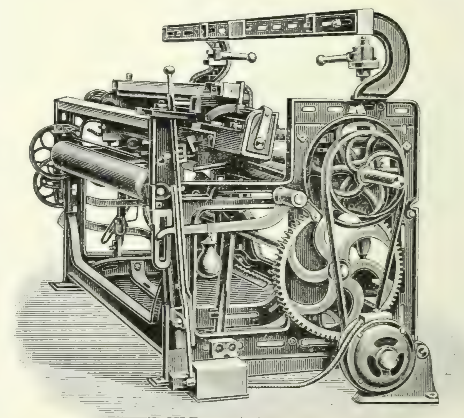
In manchen Fällen wird die Bewegung von dem Motor auf die Arbeitsmaschine durch ein Rädervorgelege bewirkt. Eine bequeme Einrichtung dazu, bei der das Rädervorgelege gleich fest mit dem Motor verbunden ist, zeigt Fig. 517. Der Drehstrommotor ist auf eine Grundplatte, die das Vorgelege enthält, aufgesetzt. Sowohl die Welle des Motors wie die des Vorgeleges laufen dabei in Kugellagern. Die rasch rotierenden Elektromotoren müssen häufig durch solche Vorgelege langsamer rotierende Maschinen antreiben.

Fig. 517.



In den meisten Fällen aber geschieht die Verbindung des Elektromotors mit der Arbeitsmaschine durch Riemen oder Schnüre. So zeigt Fig. 518 die Anbringung eines Drehstrommotors an einem Webstuhl. Vorn rechts am Boden ist der kleine Drehstrommotor. In Spinnereien verwendet man gewöhnlich gekapselte Motoren, die federnd und wippend für Riemenzug aufgestellt sind, wie z. B. der kleine Webstuhlmotor der Bergmann E.-W. in Fig. 519.

Fig. 518.

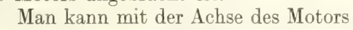


Bei elektrisch betriebenen Pumpen sind die Elektromotoren infolge ihrer großen Tourenzahl zunächst nur bei Zentrifugalpumpen direkt anzubringen gewesen, aber die neuen, rasch laufenden Kolbenpumpen erlauben ebenfalls direkten Antrieb durch Elektromotoren. Fig. 520 zeigt eine Motorpumpe der A.E.G., bei welcher der oben

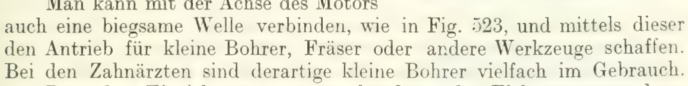
sitzende Motor durch Riemen die Pumpe antreibt.

Fig. 519.

Bei den Bohrmaschinen und Poliermaschinen wird der Bohr- oder Polierapparat häufig mit dem Motor direkt verbunden. So zeigt Fig. 521 eine Tischbohrmaschine der Siemens-Schuckertwerke. Fig. 522 zeigt eine Handbohrmaschine, die so eingerichtet ist, daß an dem Brustschild die Leitungsschnur aufgewickelt werden kann, während unter dem einen Handgriff ein Druckschalter zum Ein- und Ausschalten des Motors angebracht ist.



Man kann mit der Achse des Motors auch eine biegsame Welle verbinden, wie in Fig. 523, und mittels dieser den Antrieb für kleine Bohrer, Fräser oder andere Werkzeuge schaffen. Bei den Zahnärzten sind derartige kleine Bohrer vielfach im Gebrauch.

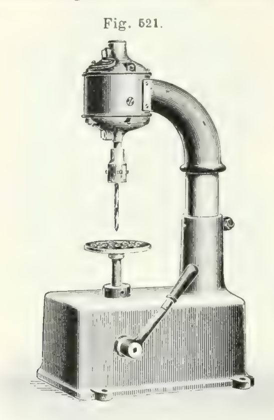


Besondere Einrichtungen müssen häufig an den Elektromotoren dann

Fig. 520.

angebracht werden, wenn diese im Betrieb mit sehr verschiedenen Geschwindigkeiten laufen müssen, wie es bei einer großen Anzahl von Arbeitsmaschinen nötig ist, bei den Drehbänken, Schleif- und Bohrmaschinen, Stoßmaschinen, in Papierfabriken, Druckereien, Webereien etc. Diese Geschwindigkeitsänderung wird bei Gleichstrommaschinen durch einen Nebenschlußregulator hervorgebracht, wobei man durch geeignete Mittel, z. B. durch Kompensationspole (oben S. 390) die Funkenbildung am Kollektor vermeiden muß.

Fig. 521.



Sehr vorteilhaft sind die Elektromotoren in großen F a b r i k e n, bei denen sie die großen, umständlichen und viel Arbeit konsumierenden H a u p t t r a n s m i s s i o n e n beseitigen. Statt von der Dampfmaschine die Bewegung durch Riemen auf große Wellen mit gemeinschaftlichem Antrieb zu übertragen und von diesen wieder auf zweite, ja sogar auf dritte Wellen, bringt man vorteilhaft an jeder Arbeitsmaschine oder an einer nahestehenden Gruppe von Arbeitsmaschinen einen Elektromotor an, zu dem die Kraft durch bequem zu führende Drähte geleitet wird, statt durch die unbequemen und kraftverzehrenden Riementransmissionen.

Fig. 522.

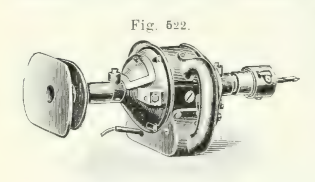
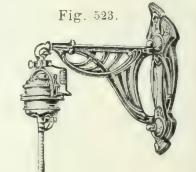


Fig. 523.



Auf K r i e g s- und H a n d e l s s c h i f f e n wird eine Reihe mechanischer Arbeiten leicht und zweckmäßig von Elektromotoren geleistet.

Ein sehr ausgedehntes Feld hat sich die elektrische Arbeitsleistung bei den A u f z ü g e n für Personen und Lasten erworben. Es stellt sich nämlich der Betrieb eines elektrischen Aufzuges, wenn eine Stromzufuhr in dem Hause vorhanden ist, ungefähr 5- bis 10mal so billig wie der Betrieb mittels Gasmaschinen oder mittels Wasserleitungswasser, und zwar aus dem Grund, weil der Elektromotor eben nur zu laufen braucht, wenn der Aufzug in Betrieb gesetzt ist, und weil sich sein Energieverbrauch durchaus nach der gerade beförderten Last richtet. Die elektrischen Aufzüge werden jetzt derart konstruiert, daß der Elektromotor im Keller oder auf dem Boden neben dem Schacht für den Aufzug steht.

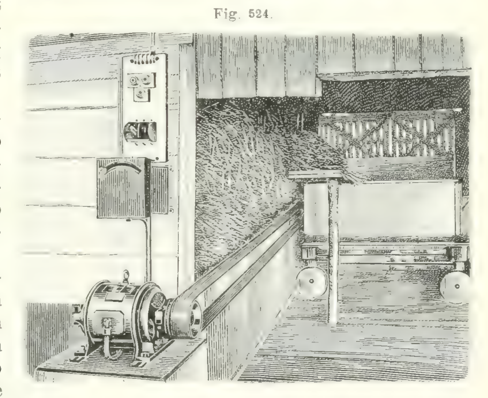
Der Aufzug selbst hängt an Seilen, und durch den Elektromotor werden diese Seile auf eine Trommel aufgewickelt oder von ihr abgewickelt, wobei der Aufzug sich hebt oder senkt. Es müssen natürlich dabei Vorrichtungen angebracht sein, daß man von dem Fahrstuhl selbst aus den Motor in Betrieb setzen kann und ihn sowohl nach der einen als nach der anderen Richtung in Bewegung bringen kann. Diese Steuervorrichtungen für Aufzüge sind jetzt für elektrischen Betrieb so ausgebildet, daß durch bloßen Druck auf einen Knopf, sei es von außen oder vom Fahrstuhl selbst, der Aufzug sich in Bewegung setzt und von selbst stoßfrei in der gewünschten Etage stehen bleibt. Dadurch kann in vielen Fällen das Bedienungspersonal für einen Aufzug erspart werden.

Die Laufkranen in Fabriken und die Schiffskranen werden jetzt fast allgemein durch Elektromotoren angetrieben.

Die Vorzüge der Elektromotoren bestehen in der sofortigen Betriebsbereitschaft, in der Gefahrlosigkeit, in dem kleinen Raum, welchen sie einnehmen, und der Billigkeit der Anlage, verglichen mit den Anlagekosten für kleine Gasmaschinen oder Dampfmaschinen, und endlich darin, daß sich ihr Verbrauch direkt nach der Leistung richtet. Denn da die Klemmenspannung konstant bleibt, so ist der Effekt allein abhängig von der Stromstärke, die nach der Leistung größer oder kleiner wird. Die verbrauchte Stromstärke, die mit einem Elektrizitätszähler (s. Kap. 9) gemessen und nach irgend einem Satz berechnet wird, bedingt die Kosten des Betriebes.

Eine wesentliche und in den letzten Jahren stets wachsende Bedeutung hat die elektrische Arbeitsleistung in Bergwerken wegen ihrer großen Gefahrlosigkeit und wegen der Leichtigkeit, mit der die Leitung zu den Motoren geführt werden kann, gewonnen. Die Elektromotoren werden dort zum Betrieb von Pumpen, Ventilatoren und Bohrmaschinen und zum Betrieb der Fördermaschinen gebraucht.

Fig. 524.



In der Landwirtschaft, welche an sich die schwierigsten Bedingungen für den maschinellen Betrieb bietet, hat gerade die Elektrizität sich bereits einen sehr weitgehenden Wirkungskreis erobert. Abgesehen von der elektrischen Beleuchtung, welche für das Herrschaftshaus und für Wirtschaftshäuser und Ställe billigen und früher unmöglichen Komfort bietet, ist es namentlich die elektrische Arbeitsleistung, welche sich auf großen und mittleren Gütern als äußerst nützlich erwiesen hat. Die Elektromotoren werden dabei zum Antrieb von Dreschmaschinen, Buttermaschinen, Häckselschneidemaschinen, Schrotmühlen, Pumpen,

Rübenschneidern, Kuchenbrechern u. s. w. benutzt. In Fig. 524 ist der Antrieb einer Dreschmaschine, in Fig. 525 der einer Häckselschneidemaschine durch einen kleinen Drehstrommotor abgebildet. In der Landwirtschaft mit ihren ausgedehnten Flächen kommt meistens, wegen der billigen Fortleitung, hochgespannter Drehstrom in Frage. Die Drehstromdynamo wird dabei, wenn Wasserkräfte vorhanden sind, am besten von einer solchen getrieben, sonst müssen Dampfmaschinen oder auch Lokomobilen zum Betrieb derselben aufgestellt werden. Dabei hat es sich in vielen Fällen als sehr vorteilhaft erwiesen, eine gemeinsame Anlage zur Erzeugung des Stromes für mehrere benachbarte Güter einzurichten. Die Gleichstrommaschine zur Erregung der Drehstrommaschine wählt man dabei zweckmäßig gleich größer, als für die bloße Erregung notwendig ist, damit man von ihr auch Akkumulatoren laden kann, die zur Beleuchtung der Wohnhäuser während der Nacht, wo die Drehstrommaschine nicht arbeitet, dienen können. Die Transformierung des hochgespannten Drehstroms für die einzelnen Motoren kann man dann durch fahrbare Transformatoren vornehmen, die man auf freiem Felde aufstellt, wo sie gerade benötigt werden. Dadurch kann man auf bequeme Weise auf freiem Felde Elektromotoren betreiben, die z. B. auch zum Pflügen, zum Mähen benutzt werden. Die kleinen Motoren für viele der oben angegebenen kleinen Arbeiten werden so eingerichtet, daß sie leicht von einer Stelle zur anderen getragen werden können, z. B. auf die verschiedenen Etagen eines Speichers. Fig. 526 zeigt den Transport eines solchen Speichermotors. Derartige transportable Motoren werden mit einer Leitung mit Anschlußstöpsel versehen, durch welchen sie an die vorhandenen Leitungen angeschlossen werden, ganz so, wie wir es bei den Glühlampen (S. 507) beschrieben haben. An dem gezeichneten Motor sieht man auch die Anschlußleitung. Für den elektrischen Betrieb von

Fig. 525.

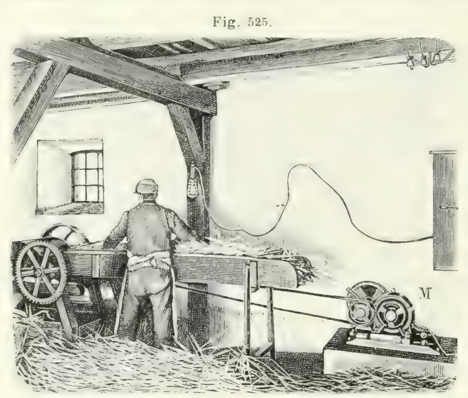
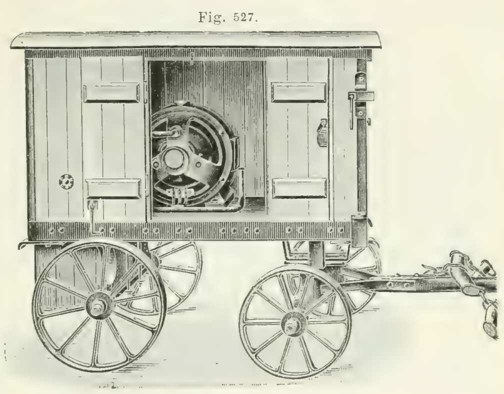


Fig. 526.



Dreschmaschinen, der bedeutende Vorteile gegenüber dem Betrieb mit Lokomobilen hat und der auch bei so kleinen Maschinen schon vorteilhaft ist, für die sonst bloß Göpelbetrieb angewendet wurde, hat die A.E.G. einen besonderen Dreschmotorwagen konstruiert, der in Fig. 527 abgebildet ist. Er enthält in seinem mittleren Teile den Elektromotor, im hinteren die Anlaßapparate und Werkzeuge, im vorderen ein 50 m langes Anschlußkabel. Der ganze Wagen bleibt im allgemeinen während des Betriebes geschlossen, nur die Riemenscheibe des Elektromotors, welche mit der Dreschmaschine verbunden wird, ragt heraus und hinten ein Handrad, welches zur Ein- und Ausschaltung des Stromes dient. Die Deichsel des Wagens ist zum Hochstellen eingerichtet und dient als Träger für das Kabel und eventuell zugleich als Träger für eine elektrische Lampe beim Arbeiten in der Dunkelheit. Für die ungeübten und durch die Grundlehren der Elektrizität durchaus ungetrübten Arbeitskräfte auf dem Lande sind die Schaltungen so ausgeführt, daß sie fast unmöglich falsch bedient werden können und daß jedenfalls falsche Bedienung keinen Schaden anrichtet. Auch für die gewöhnlich nicht hervorragend zarte Bedienung ist bei der ganzen Konstruktion schon Vorsorge getroffen.

Fig. 527.

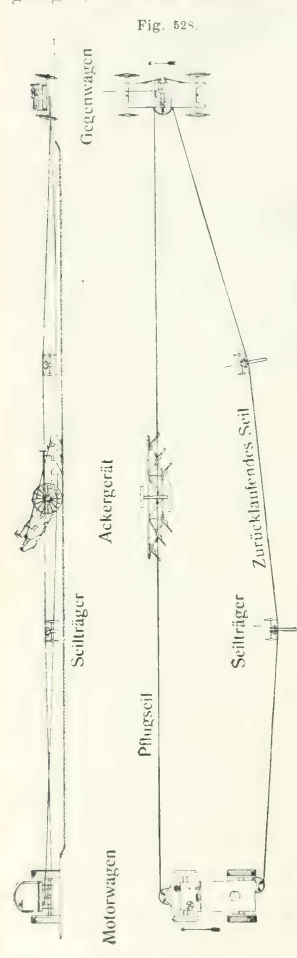


In derselben, dem praktischen Betrieb angemessenen Weise sind auch elektrische Pflüge eingerichtet, deren Vorteile selbst vor den Dampfpflügen in ihrer einfachen Bedienung bestehen und auch darin, daß weder Kohle noch Wasser ihnen zugeführt werden muß. Die A.E.G. und die Siemens-Schuckertwerke haben die Methoden des elektrischen Pflügens bis in die Einzelheiten vollständig ausgebildet.

Da gerade das Pflügen mittels Elektrizität eine der schwierigsten Aufgaben ist, welche der Elektrotechnik gestellt wurde, so mögen die dazu nötigen Einrichtungen in der Form, wie sie die A.E.G. ausführt, etwas näher besprochen werden. Zunächst ist es klar, daß sich das maschinelle Pflügen nur für große Flächen eignet, bei denen es aber dann um so vorteilhafter wird, weil es eine außerordentliche Ersparnis an Zeit und an Arbeitskräften erzielt. Der elektrische Strom, der den Elektropflug treibt, muß entweder in einer besonderen Anlage erzeugt werden, oder er kann jetzt schon in manchen Fällen aus einer der Überlandzentralen entnommen werden, von denen wir in Kapitel 8 sprechen werden. Der Verbrauch an elektrischer Energie ist kein geringer. Die Elektropflüge werden in Größen von 38 bis 72 Pferdekräften gebaut, und dement-

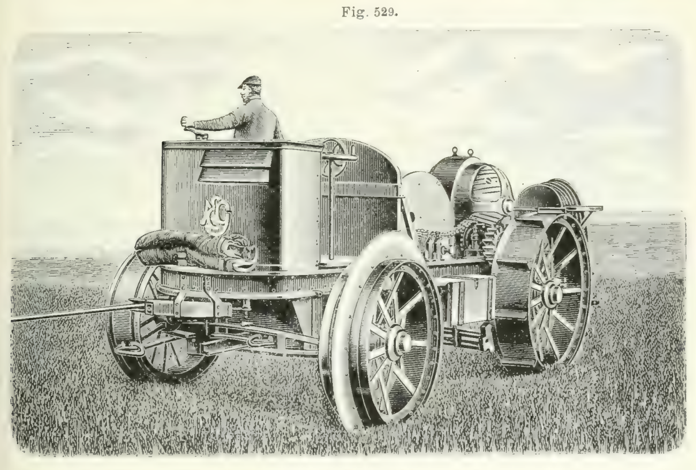
sprechend muß die Größe der zuzuführenden elektrischen Energie sein. Der Pflug selbst wird an einem Seile zwischen einem Motorwagen und einem Gegenwagen, die bis zu 400 Meter auseinanderstehen, hin und hergezogen, wobei er seine Arbeit verrichtet. Fig. 528 zeigt die allgemeine Anordnung eines solchen Betriebes. Von dem Motorwagen geht ein Seil zu dem Gegenwagen, an dem es über eine Rolle läuft, und von dem aus es dann über Seilträger zum Motorwagen zurückläuft. Durch den Elektromotor, der auf dem Motorwagen, Fig. 529, sitzt, werden Trommeln gedreht, durch die das Seil bewegt wird. Der Motor kann übrigens durch Umlegung einer Kuppelung auch auf die Hinterräder des Wagens wirken, so daß er den Motorwagen vor Beginn und nach Beendigung des Pfluggeschäftes mit allen andern angehängten Gefährten selbsttätig fortbewegt. Das Seil wird nun über die Rolle des Gegenwagens, Fig. 530, gelegt, dessen Räder mit Radscheiben versehen sind, durch die er fest am Boden gehalten wird, wenn der Pflug vom Motorwagen zum Gegenwagen hin gezogen wird. In das Seil ist nun das Ackergerät, Fig. 531, eingehängt, das mit jeder von beiden Seiten arbeiten kann, und das durch das Seil vom Gegenwagen zum Motorwagen und vom Motorwagen zum Gegenwagen gezogen wird. Im letzteren Fall wird der Gegenwagen von dem ganzen Zug mit angegriffen, muß also sehr fest im Boden stehen, im ersteren Fall dagegen wirkt der Zug direkt hauptsächlich auf das Ackergerät, der Gegenwagen ist entlastet und rückt infolge der Umdrehung der Rolle vor um Strecken, die man nach Bedarf bestimmen kann. Die Seilträger endlich, Fig. 532, die das Seil zurücktransportieren, bewegen sich ebenfalls selbsttätig je nach der geleisteten Arbeit weiter, so daß ohne Zuhilfenahme vieler Arbeitskräfte (2 bis 4 Mann, je nach der Größe der Apparate) rasch große Flächen gepflügt werden können. Die Leistungen eines solchen Elektropflugs werden je nach der Größe der Anlage auf 10 bis 40 Morgen pro Tag angegeben. Auch rein ökonomisch betrachtet arbeitet der elektrische Pflug meistens billiger als der Dampfpflug und auch billiger als

Fig. 528.



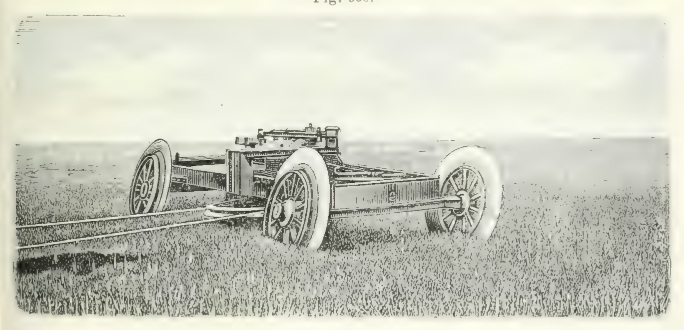
der durch Gespanne betriebene Pflug. Es ist zu erwarten, daß die Landwirtschaft sich immer mehr auch für das Pflügen der Elektrizität bedienen wird, was bis jetzt allerdings noch nicht in genügendem Maße der Fall ist.

Fig. 529.



Die große Bedeutung der elektrischen Arbeitsleistung für das Gewerbe besteht darin, daß es durch sie möglich wird, kleine Motoren, kleine Kräfte unter $^1/_2$ Pferdekraft, bequem aufzustellen und zu betreiben. Diese Maschinenbetriebskraft in kleinem Umfange ist es gerade, welche dem Kleingewerbe früher fehlte. Aus Mangel an Maschinenbetrieb kam es in

Fig. 530.

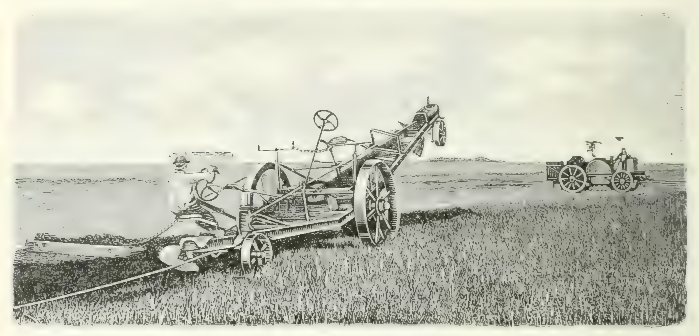


Nachteile gegenüber dem Großgewerbe. Durch Einführung von elektrischen Strömen, die in Zentralstationen erzeugt und überallhin geleitet werden, werden nun aber dem Kleingewerbe Motoren schon von $^1/_{16}$ Pferdekraft

geliefert, welche ihre Arbeit zu billigem Preise leisten und deren Verbrauch an Elektrizität in demselben Verhältnis steht wie die geleistete Arbeit.

Die elektrische Kraftverteilung ist also nationalökonomisch und sozialpolitisch von hervorragender Wichtigkeit. Die Elektrizität selbst wird dabei in großen Zentralstationen, sei es durch Maschinen-

Fig. 531.



kraft, sei es durch Wasserkraft, erzeugt, und durch ihre Vermittelung wird die Kraft auf viele Stellen verteilt. Technisch ist es dabei notwendig, diese Verteilung so zu bewerkstelligen, daß ein Motor den anderen nicht stört, daß z. B. der eine Motor außer Tätigkeit gesetzt werden kann, ohne daß die anderen Motoren in ihrem Gange beeinflußt werden und dadurch unzweckmäßig arbeiten. Diese Aufgabe ist ganz analog derjenigen, welche beim Betrieb von Glühlampen in einem ganzen Stadtteil sich ergab. Auch

Fig. 532.



dort kam es darauf an, jede Glühlampe unabhängig von den anderen zu machen, es durften 100, 1000 Lampen zu gleicher Zeit ausgelöscht werden, ohne daß die anderen dadurch gestört wurden. Diese Aufgabe wird dadurch gelöst, daß die Glühlampen alle nebeneinander geschaltet werden und daß die Dynamomaschinen, welche den ganzen Strom

erzeugen, so reguliert werden, daß in den Leitungen, zwischen welchen die Glühlampen eingeschaltet sind, stets dieselbe Spannung herrscht. Genau so ist die Lösung, die für die elektrische Arbeitsleistung allgemein gebraucht wird.

Auch bei der Arbeitsverteilung werden alle Elektromotoren, die also an den verschiedenen Stellen Arbeit zu leisten haben, nebeneinander (parallel) in den Stromkreis eingeschaltet, der von der Zentralstation kommt.

Die Größe der Arbeit, welche jeder Elektromotor (bei Gleichstrom) pro Sekunde leisten kann, ist gleich dem Produkt aus seiner Klemmenspannung und der Stromstärke, welche in ihm herrscht. Die Stromstärke in jedem parallel geschalteten Elektromotor hängt, wenn seine Klemmenspannung dieselbe bleibt, nur ab von der Arbeit, die der Motor leistet. Wenn man also bewirken kann, daß die Klemmenspannung an den Enden jedes Elektromotors dieselbe bleibt, welches auch die Vorgänge sonst in dem Stromkreis sind, so wird jeder Motor ganz unabhängig von den Vorgängen in den anderen Maschinen sein. Dies ist also das einzige, was verlangt wird: Es muß an den Enden jedes Elektromotors stets dieselbe Klemmenspannung herrschen. Und dies wird erreicht, indem man die Elektromotoren alle parallel zwischen Leitungen von konstant gehaltenem Spannungsunterschied einschaltet.

Der Gebrauch der Elektromotoren hat sich allmählich rapid ausgedehnt. In allen Städten, in welchen durch elektrische Zentralstationen eine bequeme Zuleitung des elektrischen Stromes vorhanden ist, wird für den Betrieb von Elektromotoren jetzt mehr an Strom verbraucht, als für die Erzeugung von Licht, und überall zeigt sich der leichte, gefahrlose, bequeme und auch billige Betrieb der Elektromotoren von größtem Vorteil. In diesem Sinne trägt also die Elektrizität das Ihrige mit dazu bei, um die jetzt im Vordergrund des Interesses stehende soziale Frage der Lösung dadurch näher zu bringen, daß sie den Kleinen dieselben Vorteile in der Arbeitsleistung zuwendet, welche die Großen schon lange haben. Der Aufschwung, den die Industrie in Deutschland erfahren hat und das höhere Niveau, auf welches die Lebensführung fast aller Kreise gehoben worden ist, sind zu einem nicht unerheblichen Teile der Anwendung der Elektrizität zu danken.

8. Kapitel.

Die elektrische Kraftübertragung.

Die große Leichtigkeit, mit der elektrische Ströme auf Drähten über weite Strecken hinweggeführt werden können und die man anfangs nur in der Telegraphie verwertete, um Signale und Zeichen in die Ferne zu schicken, diese Eigenschaft erlaubt der Elektrizität, eine der größten und folgenreichsten Aufgaben zu lösen, nämlich, Kräfte, sei es die von der Natur direkt gebotenen oder die von uns künstlich hergestellten, ihre Wirksamkeit an weit entfernten Stellen ausüben zu lassen, also die Übertragung der Kraft zu ermöglichen.

Im Grunde genommen haben wir es bei allen Leistungen der Elektrizität mit einer Übertragung der Kraft zu tun. Wenn wir z. B. im Keller eines Hauses eine Gasmaschine aufstellen, durch diese eine Dynamomaschine treiben und mit deren Strömen in den einzelnen Stockwerken Glühlampen speisen oder Bogenlampen brennen lassen oder Elektromotoren treiben, so haben wir schon die Kraft der Gasmaschine oder, besser gesagt, die Arbeit, die die Gasmaschine leistet, in die verschiedenen Stockwerke übertragen und sie teils zur Beleuchtung, teils wieder zur Leistung von Arbeit (durch die Elektromotoren) verwendet. Man spricht aber in diesem Fall nicht von Kraftübertragung, weil die Entfernung zwischen der Stelle, wo die Kraft vorhanden ist, und denjenigen Stellen, wo sie nützliche Arbeit leistet, eine geringe ist, die man eventuell auch durch andere Transmissionsmittel überwinden könnte, sondern man spricht von eigentlicher Kraftübertragung erst dann, wenn die Entfernungen so groß sind, daß man außer durch Elektrizität nur durch komplizierte Mittel, wie Druckluft, die Kraft überhaupt verwenden könnte. Bei der Elektrizität ist aber prinzipiell ein Unterschied zwischen der Kraftübertragung auf geringe und auf große Entfernungen nicht vorhanden, weil eben die elektrischen Ströme sich so leicht auf Drähten beliebig weit fortführen lassen, während gerade bei allen anderen Übertragungsmitteln, selbst bei Druckluft und Drahtseilen mit wachsender Entfernung bald eine Grenze ihrer Anwendbarkeit kommt.

Bei der elektrischen Kraftübertragung werden also zuerst durch Aufwendung von Arbeit, z. B. von einer Dampfmaschine oder einer Wasserkraft, elektrische Ströme in einer Dynamomaschine erzeugt; diese werden durch Drahtleitungen beliebig weit fortgeführt und in eine zweite Dynamomaschine, den Elektromotor, eingeführt und dessen Anker wird dann durch sie in Drehung versetzt. Durch diese Drehung kann man dann die zweite Maschine Arbeit leisten lassen, indem man ihre Bewegung in gewöhnlicher Weise durch Riemen oder Zahnräder auf irgend eine Arbeitsmaschine überträgt, wie wir das im vorigen Kapitel besprochen haben. Da die beiden Dynamomaschinen, die stromgebende und die

arbeitleistende, beliebig weit auseinander stehen können, so kann man also die Ströme da erzeugen, wo die Betriebskraft billig ist, und kann auf elektrischem Wege Arbeit dort leisten, wo die Betriebskraft teuer ist. Ferner kann man die elektrischen Ströme ja beliebig verzweigen, man kann also auch von einer Kraftmaschine aus mittels Elektrizität die Kraft auf beliebig viele Punkte verteilen, was bei direkter Benutzung der Kraftmaschine nur in speziellen Fällen möglich ist.

Im letzteren Falle hat man also eine Übertragung und Verteilung von Arbeit.

Die elektrische Arbeitsübertragung, wie sie eben skizziert wurde, erfordert mithin notwendig eine Reihe von Maschinen. Erstens nämlich die Kraftmaschine, den Motor. Hauptsächlich wird als solcher eine Turbine genommen werden, da es sich meistenteils um die Verwertung von Wasserkräften handelt, es kann aber auch eine Dampfmaschine oder eine Gasmaschine oder ein durch Wind getriebenes Rad die ursprüngliche Kraftmaschine sein. Von dieser Kraftmaschine wird die Bewegung auf eine Dynamomaschine übertragen, in welcher die mechanische Arbeit in elektrische Ströme umgewandelt wird. Diese Dynamomaschine nennt man die primäre Maschine. Von ihr aus werden dann die elektrischen Ströme durch Drähte fortgeleitet bis zu einer zweiten Dynamomaschine, der sekundären Maschine, deren Anker durch diese elektrischen Ströme in Drehung kommt und Arbeit leisten kann. Man braucht also in dieser Anordnung zu jeder elektrischen Kraftübertragung einen Motor, eine primäre und eine sekundäre Dynamomaschine und eine Drahtleitung.

Die hauptsächlichste Anwendbarkeit dieser direkten elektrischen Kraftübertragung besteht, wie gesagt, darin, daß eine Kraftquelle dadurch an einer Stelle Arbeit leisten kann, von der sie weit entfernt ist. Es dient also diese elektrische Übertragung der Arbeit hauptsächlich dazu, um Wasserkräfte an entfernten Stellen Arbeit verrichten zu lassen. Die Energie, welche von Wasserfällen und überhaupt von fließendem Wasser zum Treiben von Maschinen benutzt werden kann, wird ja von der Natur in unerschöpflicher Fülle direkt geboten, und die Benutzung derselben erfordert oft keine viel größeren Kosten als die der ersten Einrichtung. Wenn also auch bei der elektrischen Kraftübertragung auf einigermaßen weite Entfernungen 25 Proz. der Arbeit verloren gehen sollten, so kann es doch in vielen Fällen von großem Vorteil sein, diese direkt dargebotenen natürlichen Kräfte zur Arbeitsleistung zu verwenden, die man sonst ganz unbenutzt lassen muß. In der Tat macht die Ausnutzung der Wasserkräfte auf elektrischem Wege seit Jahren sehr bedeutende Fortschritte. Die Schweiz ist darin mit gutem Beispiel vorangegangen, aber auch in Deutschland haben die Industriellen und die Regierungen allmählich die große Bedeutung dieser Kraftübertragung einsehen gelernt.

Ein anderes Gebiet der Anwendung der elektrischen Kraftübertragung, das aber erst anfängt, angebaut zu werden, ist folgendes. Alle unsere Arbeitsmaschinen werden ja hauptsächlich vermittels Dampfmaschinen durch Verbrennung von Kohlen getrieben, und es müssen die Kohlen aus den Bergwerken an die betreffenden Stellen geschafft

werden, wo sie verwendet werden sollen. Falls die Kosten dieses Transportes größer sind als der Verlust, den man an Energie (und an Zinsen der Einrichtungskosten) durch die elektrische Kraftübertragung erleidet, so empfiehlt es sich offenbar mehr, die Kohlen, anstatt sie zu transportieren, an den Bergwerken selbst in großen Dampfmaschinen zu verbrennen und die Kraft auf elektrischem Wege dorthin zu leiten, wo man sie braucht. Solche Anlagen beginnt man jetzt in der Nähe der Kohlenbergwerke tatsächlich einzurichten.

Ferner ist es in vielen Fällen auch vorteilhaft, auf elektrischem Wege Kraft zu übertragen, wenn es gilt, eine Reihe von weit auseinander liegenden kleinen Maschinen zu betreiben. Erfahrungsgemäß stellt sich der Verbrauch an Kohlen für kleine Dampfmaschinen von wenigen Pferdekräften relativ ziemlich doppelt und dreifach so hoch, als für große Dampfmaschinen schon von 50 bis 100 Pferdekräften. Wenn man also statt einer Reihe von kleinen Dampfmaschinen eine große aufstellt und ihre Arbeit auf elektrischem Wege an verschiedene Orte verteilt, so kann man an Unterhaltungs- und Einrichtungskosten sparen. Dies sind einige Fälle, in denen die elektrische Kraftübertragung mit Vorteil eintritt.

Es fragt sich jedoch zuerst, welches speziell die Vorgänge bei der elektrischen Kraftübertragung sind, und auf welche Ausbeute man dabei rechnen kann.

Wenn die primäre Maschine von einer Kraftmaschine getrieben wird und in dem ganzen äußeren Stromkreis sich keine andere Maschine befindet, so hängt die Stromstärke im ganzen Kreise nur ab von der elektromotorischen Kraft der Maschine und dem gesamten Widerstande, sowohl dem inneren der Maschine, als dem äußeren des Stromkreises, und zwar nach dem Ohmschen Gesetz

$$\text{Stromstärke} = \frac{\text{elektromotorische Kraft der Maschine}}{\text{Gesamtwiderstand}}.$$

Bei bestimmter Tourenzahl und bestimmtem Widerstand hat die Maschine eine bestimmte elektromotorische Kraft und es herrscht daher eine bestimmte Stromstärke.

Befindet sich nun eine zweite Dynamomaschine in dem Stromkreis und wird diese durch den Strom der ersten in Bewegung gesetzt, so entsteht in dem Anker derselben ja ebenfalls eine elektromotorische Kraft, welche der der ersten Maschine, wie wir wissen, entgegengesetzt ist. Es besteht also jetzt der Gesamtwiderstand des ganzen Systems aus dem inneren Widerstand der beiden Maschinen und aus dem Widerstand der Verbindungsdrähte. Und die gesamte elektromotorische Kraft, die im Stromkreise wirkt, ist die Differenz der elektromotorischen Kräfte beider Maschinen, so daß sich die Stromstärke jetzt nach dem Ohmschen Gesetz folgendermaßen darstellt:

$$\text{Stromstärke} = \frac{\text{Differenz der elektromotorischen Kräfte}}{\text{Gesamtwiderstand}}.$$

Wenn also der Gesamtwiderstand des Stromkreises jetzt der gleiche ist wie früher, so ist doch die Stromstärke jetzt eine geringere als in dem

Fall, wo keine sekundäre Maschine vorhanden war, weil eben die elektromotorische Kraft der zweiten Maschine entgegenwirkt. Die elektromotorische Kraft jeder Maschine hängt außer von dem gesamten Widerstand und ihrer sonstigen Einrichtung nur ab von der Geschwindigkeit, mit welcher ihr Anker rotiert. Sind also die beiden Dynamomaschinen gleich gebaut, so hängt die Stromstärke nur ab von der Differenz der Geschwindigkeit beider Maschinen und dem Gesamtwiderstand. Daraus ergibt sich ein merkwürdiges Resultat. Wenn beide Maschinen ganz gleich gebaut sind und gleich schnell rotieren, so muß die Stromstärke im gesamten Stromkreis gleich Null sein. Die beiden Maschinen könnten aber bloß dann gleich schnell rotieren, wenn in beiden keine Reibungswiderstände zu überwinden wären. Dann hätte man also den Fall, daß von dem Motor die primäre Maschine getrieben wird, daß durch den Strom, der in ihr erzeugt wird, die sekundäre Maschine in Bewegung kommt, daß diese immer rascher rotiert, wodurch die Stromstärke im ganzen Stromkreis immer mehr abnimmt, und daß sie schließlich so rasch rotiert wie die erste, wobei dann durch die Leitung kein Strom fließt. In diesem Fall wird weder an der primären Maschine Arbeit geleistet, noch von der sekundären Maschine Arbeit abgegeben, in diesem Falle findet also gar keine Übertragung von Kraft statt. Dieser Fall ist natürlich nicht zu realisieren, obwohl er mit großer Annäherung praktisch erreicht werden kann.

Sobald man aber die zweite Maschine Arbeit leisten läßt, indem man sie z. B. eine Dreschmaschine treiben läßt, so nimmt ihre Geschwindigkeit, also auch ihre elektromotorische Gegenkraft ab, wodurch die Stromstärke im ganzen Kreise vergrößert wird.

Wir wollen annehmen, es sei eine elektrische Kraftübertragung im vollen Gange. Es seien also zwei Dynamomaschinen vorhanden, die durch eine beliebige Leitung verbunden seien, und es werde etwa durch eine Dampfmaschine der ersten fortwährend Energie zugeführt, während die zweite fortwährend nutzbare Arbeit leistet, z. B. Wasser aus einer Grube hebt. Wir wollen sehen, wie sich die aufgewendete und die nutzbare Arbeit zu einander verhalten. Beide Maschinen haben dabei gewisse Geschwindigkeiten und durch die ganze Leitung und die Maschinen fließt ein Strom von bestimmter Stärke.

Die gesamte Arbeit, die von der Dampfmaschine in jeder Sekunde auf die erste Maschine übertragen wird, wird nun zu folgenden Leistungen benutzt:

Erstens dient sie dazu, die Reibungswiderstände der primären Maschine zu überwinden.

Zweitens erzeugt sie durch die Drehung der primären Maschine in dieser Foucaultsche Ströme, welche sich in Wärme umsetzen und die für die Arbeitsleistung, ebenso wie die Reibung, nutzlos sind.

Drittens aber erzeugt sie in der primären Maschine eine elektromotorische Kraft, welche nun den Strom durch die ganze Leitung und in die sekundäre Maschine sendet.

Der gesamte Effekt dieses Stromes ist gleich dieser elektromotorischen Kraft multipliziert mit der Stromstärke, und zwar ist dieser Effekt in Watt ausgedrückt, wenn die elektromotorische Kraft in Volt, die

Stromstärke in Ampere gemessen wird. Aber von diesem ganzen Effekt wird ein Teil in der primären Maschine selbst verbraucht, nämlich in Joulesche Wärme verwandelt, und derjenige Effekt, der von der Maschine nach außen abgegeben wird, in die Leitung und in die sekundäre Maschine, ist nur gleich dem Produkt aus der Klemmenspannung der Maschine und der Stromstärke. Wozu nun dieser Effekt im äußeren Stromkreis verwendet wird, das ist Sache der Anordnung, der Leitung u. s. w. Er kann eventuell vollständig nutzbar verwendet werden. Das Verhältnis, in welchem dieser äußere Effekt zur aufgewendeten Arbeit steht, haben wir oben S. 402 als den Wirkungsgrad der primären Maschine bezeichnet. Dieser Wirkungsgrad beträgt bei guten Dynamomaschinen 85 bis 95 Proz.

Der Effekt im gesamten äußeren Stromkreis wird nun zu folgenden zwei Leistungen verwendet. Erstens dient ein Teil zur Erwärmung der Leitung zwischen der primären und sekundären Maschine nach dem Jouleschen Gesetz. Diese Leistung wollen wir als Leitungsverlust bezeichnen. Sie hat offenbar wirtschaftlich nur die Bedeutung eines Verlustes und es ist unsere Aufgabe, sie möglichst zu verringern. Der übrige Teil des gesamten äußeren Effektes wird von der sekundären Maschine absorbiert.

Wesentlich für die Leistung der Kraftübertragung ist nur der letztere Teil. An den Klemmen der sekundären Maschine herrscht eine bestimmte Klemmenspannung. Diese mit der Stromstärke multipliziert, gibt den Effekt in Watt, welcher von der zweiten Maschine absorbiert wird.

Dieser von der zweiten Maschine aufgenommene Effekt wird nun einerseits nutzlos verwendet zur Überwindung von Reibungswiderständen, zur Erzeugung Foucaultscher Ströme und zur Erwärmung der Drähte in der zweiten Maschine nach dem Jouleschen Gesetz; andererseits aber wird er nutzbar verwendet, nämlich zur Leistung der nutzbaren Arbeit, welche eben gerade von der sekundären Maschine verlangt wird (in unserem Beispiel zum Heben von Wasser).

Ganz entsprechend, wie oben bei der primären Maschine, ist auch hier das Verhältnis, in welchem die nutzbare Arbeit der zweiten Maschine zu dem gesamten von ihr aufgenommenen Effekt steht, der Wirkungsgrad der sekundären Maschine. Er hängt von der Güte der Konstruktion derselben ab.

Endlich bezeichnen wir das Verhältnis der ganzen geleisteten Nutzarbeit der sekundären Maschine zur gesamten von der primären Maschine aufgenommenen Arbeit als den Nutzeffekt der ganzen Kraftübertragung. Es ergibt sich daher ohne weiteres, daß dieser letztere Nutzeffekt um so größer wird, je größer die Wirkungsgrade der beiden einzelnen Maschinen sind und je geringer der Leitungsverlust ist. Der Leitungsverlust ist aber um so geringer, je kleiner die Stromstärke ist, die in der Leitung fließt, also um so geringer, je mehr die Klemmenspannungen der beiden Maschinen einander nahe kommen.

Um nun diese Verhältnisse besser übersehen zu können, soll ein Beispiel aus einer ausgeführten Kraftübertragungsanlage erörtert werden. Eine Wasserkraft in einem Ort K. sollte auf elektrischem Wege nach

einem anderen Ort S. übertragen werden, welcher 8 km von K. entfernt ist. Man stellte in K. eine primäre Maschine auf, in S. eine sekundäre Maschine. Die Leitung zwischen beiden Stationen bestand aus Kupferdraht von 6 mm Dicke. Es war nun bei einem Versuch die ganze Arbeit pro Sekunde, welche auf die primäre Maschine von der Wasserkraft übertragen wurde, 30,85 Pferdekräfte. Die Stromstärke ergab sich in der ganzen Leitung zu 11,474 Ampere und die Klemmenspannung an der primären Maschine betrug dabei 1753,3 Volt. Folglich war der Effekt im ganzen äußeren Stromkreis 1753,3 $\times$ 11,474 Watt, also 27,33 Pferdekräfte. Und daher ergab sich der Wirkungsgrad der primären Maschine zu $\frac{27,33}{30,85} = 0,886$. Das heißt: 88,6 Proz. der Arbeit, welche auf die erste Maschine übertragen wird, gehen in den äußeren Stromkreis. Die übrigen 11,4 Proz. werden nutzlos in Wärme verwandelt.

An den Klemmen der zweiten Maschine ergab sich nun ferner eine Spannung von 1655,9 Volt. Mithin ist der ganze von der zweiten Maschine aufgenommene Effekt 1655,9 $\times$ 11,420 Watt, das ist 25,69 Pferdekräfte. (Die Stromstärke war in der zweiten Maschine etwas kleiner, weil in der Leitung die Isolation nicht vollkommen war.)

Daraus ergibt sich, daß in der Leitung 27,33 — 25,69 = 1,64 Pferdekräfte verloren gingen, welche in Joulesche Wärme umgesetzt wurden. Die Nutzarbeit nun, welche die zweite Maschine pro Sekunde leistete, wurde ebenfalls direkt gemessen und ergab sich zu 23,21 PS. Von dem ganzen in sie eingeführten Effekt von 25,69 PS wurden also noch 2,48 Pferdekräfte zur Überwindung der Reibungswiderstände, zur Erzeugung Foucaultscher Ströme und zur Erzeugung der Jouleschen Wärme in der sekundären Maschine verwendet. Der Wirkungsgrad der zweiten Maschine ist daher $\frac{23,21}{25,69} = 0,903$. Die zweite Maschine verwandelt also 90,3 Proz. von der in sie eingeführten elektrischen Energie in mechanisch nutzbare Arbeit. Endlich ist der Nutzeffekt der ganzen Kraftübertragung gleich dem Verhältnis der zurückgewonnenen nutzbaren Arbeit von 23,21 Pferdekräften zu der gesamten aufgewendeten Arbeit von 30,85 Pferdekräften, also gleich $\frac{23,21}{30,85} = 0,756$. Mithin wurden 75,6 Proz. der gesamten aufgewendeten Arbeit in diesem Falle auf 8 km übertragen und dort wieder nutzbar gewonnen.

Eine sehr wesentliche Frage ist es nun, welchen Einfluß die Entfernung der beiden Maschinen auf den Nutzeffekt der Kraftübertragung hat. Je weiter die Maschinen voneinander stehen, desto länger müssen die Drähte sein, die beide Maschinen miteinander verbinden. Die Leitungsdrähte werden durch den Strom erwärmt und die Erwärmung ist direkt proportional ihrem Widerstand, wird also, unter sonst gleichen Umständen, um so größer, je länger die Verbindungsdrähte sind. Diese Erwärmung geschieht auf Kosten des Effektes im äußeren Stromkreis der primären Maschine, sie bildet also direkt eine Verringerung der von der sekundären Maschine nutzbar zu leistenden Arbeit.

Unsere obige Betrachtung über den Nutzeffekt der Kraftübertragung läßt uns sofort diesen Einfluß erkennen. Der Nutzeffekt hängt erstens ab von der Güte der beiden Maschinen, von ihrem Wirkungsgrad. Dieser ist bei allen neueren Maschinen 85 bis 95 Proz. oder mehr, also ein recht hoher. Zweitens hängt dieser Nutzeffekt aber ab von dem Verhältnis der Klemmenspannung an der sekundären und primären Maschine. Je größer dieses Verhältnis ist (es kann höchstens gleich 1 werden), um so besser ist der Nutzeffekt. Es kommt also darauf an, dieses Verhältnis möglichst groß zu machen. Nun ist aber die Klemmenspannung an der sekundären Maschine immer kleiner als die an der primären Maschine, und zwar um so viel, als der Spannungsverlust beträgt, der zur Überwindung des Widerstandes der Leitung verbraucht wird. Wird daher die Leitung sehr lang, so hat man zwei Mittel, um trotzdem das Verhältnis der Spannungen beider Maschinen möglichst nahe an 1 zu bringen, die beiden Klemmenspannungen möglichst gleich zu machen. Das eine Mittel besteht darin, daß man den langen Leitungsdrähten einen großen Querschnitt gibt. Denn dadurch wird ja der Widerstand der gesamten Leitung wieder klein. Hat etwa die Leitung die doppelte Länge zu bekommen, als in einer bereits ausgeführten Anlage, und gibt man ihr nun auch den doppelten Querschnitt, so bleibt der Spannungsverlust zwischen beiden Maschinen, also auch der Nutzeffekt, ungeändert. Aber dieses Hilfsmittel ist praktisch nicht anwendbar, weil man dann bei einigermaßen großen Entfernungen sehr dicke Kupferstäbe zur Leitung nehmen müßte, welche die Kosten der Anlage überaus verteuern würden.

Das zweite Mittel aber besteht darin, daß man überhaupt die Klemmenspannungen beider Maschinen sehr groß macht. Dann macht nämlich die Abnahme der Spannung von der ersten bis zur zweiten prozentisch viel weniger aus als bei kleineren Spannungen. Nehmen wir z. B. die obige Kraftübertragungsanlage an. Dort war

die Klemmenspannung an der primären Maschine 1753,3 Volt,
die Klemmenspannung an der sekundären Maschine 1655,9 Volt,

also der Spannungsverlust auf der 8 km langen Leitung 97,4 Volt und das Verhältnis der beiden Klemmenspannungen, von dem der Nutzeffekt abhängt, $\frac{1655{,}9}{1753{,}3} = 0{,}944$. Der Nutzeffekt der ganzen Kraftübertragung ist gleich dem Produkt aus den beiden Wirkungsgraden der Maschinen und diesem Verhältnis der Spannungen, also gleich

$$0{,}886 \times 0{,}903 \times 0{,}944 = 0{,}756.$$

Wäre nun die Leitung doppelt so lang, 16 statt 8 km, so würde der Spannungsverlust in der Leitung 194,8 Volt betragen. Um trotzdem dasselbe Verhältnis der Klemmenspannungen zu bekommen, würde man bloß beiden Maschinen nahezu die doppelte Klemmenspannung zu erteilen brauchen, der ersten etwa 3480 Volt, der zweiten also 3285,2 Volt. Dann wäre, trotz des größeren Spannungsverlustes in der Leitung, das Verhältnis der Klemmenspannungen dasselbe wie in dem angeführten

Fall, nämlich $\frac{3285,2}{3480} = 0,944$ und daher auch der Nutzeffekt der Kraftübertragung derselbe.

Diese Forderung, daß zur elektrischen Kraftübertragung auf große Entfernungen die angewandten Ströme sehr hochgespannt sein müssen, hat zuerst der französische Ingenieur Marcel Deprez bestimmt ausgesprochen, und es ist heute ein allgemein angenommener und bekannter Grundsatz, daß man durch Anwendung hoher Spannungen auf jede Entfernung hin Arbeit von beträchtlicher Größe mit großem Nutzeffekt übertragen kann.

Nun haben wir schon mehrfach gesehen, daß Dynamomaschinen für Gleichstrom sich für sehr hohe Spannungen — für mehr als 600 bis höchstens 1000 Volt — nicht gut bauen lassen, weil bei den einander nahen Wickelungen die Isolation kaum ausreichend gemacht werden kann, und weil ferner der Kommutator den hohen Spannungen gefährlich ist. Viel vorteilhafter sind für hohe Spannungen die Wechselstrom- und Drehstrommaschinen. Diese kann man direkt bis zu Spannungen von 10000 Volt konstruieren und damit schon auf sehr große Entfernungen vorteilhaft Arbeit übertragen. Ferner aber kann man noch dazu bei Wechselströmen, wie wir wissen, sehr leicht durch die Transformatoren der Spannung des Stromes noch viel höhere Werte geben, wenn es darauf ankommt. Und ferner kann man an denjenigen Stellen, an denen die Arbeit gebraucht wird, die hohen Spannungen, die immer gefährlich sind, wieder vollständig beseitigen, indem man dort durch Transformatoren aus den hohen Spannungen wieder passend niedrige hervorbringt. Die Drehströme mit Transformatoren sind also das Ideal für Arbeitsübertragungen auf weite Entfernungen, sie sind auch den gewöhnlichen einphasigen Wechselströmen deswegen überlegen, weil ja die Drehstrommotoren (wenigstens bisher) viel vorteilhafter sind als diejenigen für gewöhnlichen Wechselstrom.

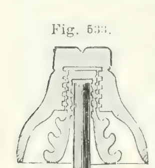
Von der Richtigkeit dieser Betrachtungen überzeugt, hat nun im Jahre 1891 die Allgemeine Elektrizitäts-Gesellschaft in Berlin in Verbindung mit der Maschinenfabrik Oerlikon eine großartige Kraftübertragungsanlage ausgeführt, welche in einem (damals noch) exzeptionell schwierigen Fall die Möglichkeit der vorteilhaften elektrischen Übertragung von Arbeit beweisen sollte, nämlich die berühmte Kraftübertragung von Lauffen am Neckar nach Frankfurt am Main auf eine Entfernung von 175 km.

Es sollten von einer Wasserkraft in Lauffen zirka 200 Pferdekräfte an die dortige Dynamomaschine abgegeben werden, und es kam darauf an, möglichst viel Pferdekräfte nach Frankfurt zu bringen. Dazu war eine kolossale Spannung, 15000—20000 Volt, nötig, und diese wurde durch Drehströme mit Transformatoren hergestellt.

Die Anlage war folgende. In Lauffen wurde durch eine Turbine eine große Drehstromdynamomaschine getrieben, welche bis zu 300 Pferdekräfte aufnehmen konnte. Sie lieferte drei getrennte Ströme von je 50 Volt Spannung und bis zu 1400 Ampere Stärke. Die Ströme wurden durch kurze Kupferkabel von 27 mm Durchmesser zu dem primären Trans-

formator, einem Öltransformator für Drehstrom gesendet. Dort wurden die drei Ströme von 50 Volt und 1400 Ampere transformiert in Ströme von etwa 14 000 Volt und 4,3 Ampere. Die letzteren Ströme von nur 4,3 Ampere ließen sich nun auf verhältnismäßig dünnen Drähten weiterleiten. Es wurden für die drei Ströme drei blanke Kupferdrähte von 4 mm Durchmesser benutzt, welche nun, wie Telegraphenleitungen, von Lauffen nach Frankfurt geführt wurden. Es wurden dazu zirka 3000 Stangen verwendet, welche je drei Porzellanisolatoren trugen. Diese Isolatoren hatten, wie Fig. 533 zeigt, inwendig Rinnen, die mit Öl gefüllt waren, damit nicht Elektrizität von den Drähten über die Oberfläche der Isolatoren — die immer feucht sind — zu den eisernen Trägern der Isolatoren gelangen könne und so zur Erde abgeleitet werde.

Fig. 533.



Die in Frankfurt ankommenden hochgespannten Ströme wurden nun durch weitere Öltransformatoren wieder zurücktransformiert auf etwa 100 Volt, so daß sie dann wieder Stärken bis zu 700 Ampere erhielten. Ein Teil dieser Ströme wurde zur Speisung einer Lampenbatterie von 1000 Glühlampen benutzt, ein anderer Teil derselben betrieb einige Drehstrommotoren. Von den letzteren setzte einer eine Pumpe in Bewegung, durch welche ein Wasserfall von 10 m Höhe in Frankfurt gespeist wurde. So war ein Teil der Energie des Wasserfalls in Lauffen nach vielen Umformungen und nach einem zurückgelegten Weg von 175 km wieder in die Energie eines Wasserfalls in Frankfurt verwandelt.

Der Versuch, so hochgespannte Ströme auf so weite Entfernung zu leiten, war also gelungen, und es kam darauf an, wie groß der Nutzeffekt dieser Arbeitsübertragung war. Von den vielen Experimenten, die mit verschiedenen Belastungen der Maschinen ausgeführt wurden, soll hier, um eine deutliche Einsicht in die Verhältnisse zu gestatten, dasjenige angeführt werden, bei dem die größte Arbeit in Lauffen aufgewendet wurde.

Bei diesem Versuch lieferte die Turbine in Lauffen einen Effekt von 197,4 Pferdekräften in die Dynamomaschine. Von diesen wurden 12,6 PS im Innern der Dynamomaschine verbraucht und 184,8 gingen von den Klemmen ab in den äußeren Stromkreis, so daß der Wirkungsgrad der primären Maschine $\frac{184,8}{197,4} = 93,5$ Proz. war.

Der Strom ging nun zunächst zum primären Transformator, wo er transformiert wurde, und von den sekundären Klemmen desselben ging nach außen noch ein Effekt von 177,6 PS, so daß 7,2 PS im Transformator verbraucht wurden. Der Wirkungsgrad des primären Transformators war also $\frac{177,6}{184,8} = 96,1$ Proz., und der Wirkungsgrad der ganzen primären elektrischen Installation (Dynamomaschine und Transformator zusammen war $\frac{177,6}{197,4} = 89,9$ Proz. Das heißt also, 89,9 Proz. der gesamten von der Turbine aufgewendeten Energie gehen in der Form von sehr hochgespanntem Strom von Lauffen weg nach Frankfurt.

In der Leitung wurden bei diesem Versuch infolge der geringen Stromstärke nur 25,2 PS für Joulesche Wärme verbraucht, so daß bis an die primären Klemmen des Transformators in Frankfurt noch 152,4 Pferdekräfte kamen. Der Verlust in der Leitung betrug also etwa 15 Proz.

Der Frankfurter Transformator hatte nun einen Wirkungsgrad von 95,7 Proz., d. h. er verwandelte den eingeführten hochgespannten Strom von 152,4 PS Effekt in niedrig gespannten Strom von 145,8 Pferdekräften Effekt.

Man konnte also in Frankfurt 145,8 PS von den Klemmen des Transformators als niedrig gespannten Strom von etwa 100 Volt abnehmen und beliebig verwenden für Beleuchtung, Arbeitsleistung oder dergleichen.

Daher ist der Nutzeffekt der ganzen Kraftübertragung zwischen der Turbine in Lauffen und der Verbrauchsstelle in Frankfurt $\frac{145,8}{197,4} = 73,9$ Proz.

Dieser Nutzeffekt war damals ein außerordentlich großer.

Allerdings zeigt dieser Versuch auch, daß man praktisch auf so weite Entfernungen nur sehr große Kräfte übertragen kann. Denn wenn auch der Verlust an Energie ein verhältnismäßig niedriger ist, so sind doch die Kosten der Anlagen (der Stangen und Drähte) so hoch, daß sie die Rentabilität bei geringer Größe der übertragenen Arbeit aufheben. Je größer aber die ganze übertragene Arbeit ist, desto weniger kommen die Anlagekosten praktisch in Betracht.

Aber andererseits hat dieser Versuch klar gezeigt, daß die Ausführung solcher elektrischer Kraftübertragungsanlagen mit hohem Nutzeffekt jetzt überall und auf alle in Betracht kommenden Entfernungen möglich ist. Wo also die Herleitung von Energie aus der Ferne sich rechnerisch lohnt, da besteht auch keine Schwierigkeit mehr in der praktischen Ausführung der Anlage, und in der Tat sind jetzt bereits eine größere Zahl von Kraftübertragungsanlagen ausgeführt, bei denen normal eine Spannung von 10 000 Volt in den Leitungsdrähten herrscht.

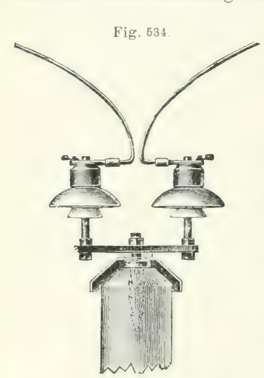
Bei Spannungen bis zu dieser Höhe umgeht man den primären Transformator ganz, und erzeugt vielmehr in der primären Drehstrommaschine selbst die hohe Spannung von 10 000 Volt, was man ja, wie wir wissen, erreichen kann, da dort nur in den feststehenden Windungen die hohe Spannung herrscht. Durch die Beseitigung des primären Transformators macht man den Wirkungsgrad der primären elektrischen Installation höher, weil die Verluste im primären Transformator fortfallen, und diese Erhöhung drückt sich dann auch im Nutzeffekt der ganzen Kraftübertragung aus.

Das Bestreben der Elektrotechnik geht aber natürlich darauf hin, zu noch viel höheren Spannungen zu gelangen. Auch sind schon Anlagen von Kraftübertragungen mit 50 000 bis 100 000 Volt Spannung eingerichtet. In den letzten Jahren haben die Siemens-Schuckertwerke einige große Kraftübertragungsanlagen mit sehr hohen Spannungen auf große Entfernungen ausgeführt. So werden von Moosburg nach München auf 54 km Entfernung 4200 Kilowatt mittels hochgespannten Drehstroms von 50 000 Volt Spannung übertragen und eine neuere Anlage in Spanien benutzt sogar eine Spannung von 66 000 Volt, um 30 000 Pferdekräfte von Molinar nach Madrid, Cartagena, Alcoy und Valencia zu übertragen.

Die Schwierigkeiten der Isolation wachsen natürlich bei diesen hohen Spannungen rapid, und außerdem ist die Gefahr solcher Anlagen, bei denen elektrische Funken auf 10 bis 30 cm Entfernung aus den Leitungen an jeder Stelle herausschlagen können, eine sehr große. Selbstverständlich sind die ganz hohen Spannungen nur auf der Leitung vorhanden, in den Endstationen werden durch Transformatoren immer gefahrlose Spannungen erzeugt. In den meisten Fällen begnügt man sich aber bisher, Kraftübertragungen auf solche Entfernungen nur einzurichten, bei denen man mit 5000 bis 10 000 Volt Spannung noch wirtschaftliche Resultate erzielt.

Bei Fernleitungen, die sich oft auf viele Kilometer erstrecken und welche Spannungen bis zu 10 000 Volt führen, ist eine Vorsichtsmaßregel von hoher Bedeutung, nämlich die Sicherung aller Apparate gegen Blitzschlag. Wenn irgendwo auf dem Wege der Blitz in die Leitung schlägt, so kann er in die Maschinen und Apparate dringen und diese zerstören. Man kann sich aber durch sogenannte Leitungsblitzableiter davor schützen. Der Blitz ist nämlich eine äußerst rasche elektrische Bewegung, die sogar häufig, wie es scheint, aus sehr raschen elektrischen Schwingungen besteht. Wir wissen aber, daß bei sehr raschen elektrischen Bewegungen nicht der gewöhnliche Widerstand es ist, welcher den Stromdurchgang erschwert, sondern die Selbstinduktion. Eine kleine Luftstrecke von einigen Millimetern Abstand, etwa zwischen zwei Metallplatten, läßt die Blitzentladung leicht durchgehen, obwohl der Widerstand der Luft enorm ist, während ein paar Meter Kupferdraht, namentlich wenn er spiralförmig aufgerollt ist, dem Blitz einen viel schwereren Weg bieten. Dadurch aber kann man einen Blitz, der in eine Leitung eingedrungen ist, unschädlich machen. Man schaltet nämlich an jeder Leitung, die zur Maschine führt, und zwar parallell zu ihr, je ein paar solche Platten mit Luftzwischenraum derartig ein, daß jedesmal die eine Platte mit der Leitung, die andere mit der Erde verbunden ist. Ein solches System nennt man einen Leitungsblitzableiter. Ist ein Blitz in eine der Leitungen geschlagen, so gelangt er, bevor er an die Maschinen kommt, an diesen Blitzableiter, überspringt den Luftzwischenraum und geht zur Erde, dringt aber nicht in die Maschinen ein. Ebenso schaltet man solche Blitzableiter vor jeden zu schützenden Apparat.

Fig. 534.



Bei hochgespannten Strömen aber, um die es sich für uns jetzt handelt, ist dabei noch eine große Schwierigkeit vorhanden. Zunächst muß natürlich der Abstand der Platten oder Drähte, die den Blitzableiter bilden, so groß sein, daß der eigentliche Maschinenstrom nicht durch die Luftschicht gehen kann, der Abstand muß größer sein als die Schlagweite, welche zu der vorhandenen Maschinenspannung gehört. Schlägt aber der Blitz in die Leitung ein und geht er durch den Blitzableiter zur Erde, so wird dadurch das Metall der beiden Blitzableiterplatten zum Teil

zerstäubt und die Luft zwischen den Platten wird erwärmt, so daß nun der Maschinenstrom diesen Widerstand auch überwinden kann, es bildet sich sofort ein Lichtbogen zwischen den Platten und der Maschinenstrom fließt nun auch seinerseits durch den Blitzableiter zur Erde, wobei der Lichtbogen dauernd anhält und starke Feuererscheinungen und Feuersgefahr bietet. Der Blitz ist zwar beseitigt, aber die Maschine ist, vielleicht gleich mit allen beiden oder drei Polen, mit der Erde verbunden, der Teufel ist zwar ausgetrieben, aber nur durch Beelzebub. Man muß daher dafür sorgen, daß sofort nach einem Blitzdurchgang der entstehende Lichtbogen wieder ausgelöscht wird. Das beste und einfachste Mittel dazu sind die Hörnerblitzableiter der Siemens-Schuckertwerke, von denen Fig. 534 eine Abbildung gibt. Diese bestehen aus zwei gebogenen Metallstäben, welche unten einen kleinen Abstand haben, der sich nach oben immer mehr erweitert. Bildet sich durch den Blitz unten an der engsten Stelle ein Lichtbogen, so wird dieser sofort, da die erwärmte Luft nach oben dringt, aufwärts getrieben, er wandert den Hörnern entlang nach oben, bis der Abstand so groß geworden ist, daß die Maschinenspannung ihn nicht überwinden kann. Dadurch verlöscht er ganz von selbst. In Fig. 535 ist gezeichnet, wie diese Blitzableiter in der Nähe einer Drehstrommaschine angebracht werden. Von jeder der drei Leitungen führt ein kurzer, etwas gewundener Draht zu dem einen Horn des Blitzableiters B, und von dessen anderem Horn geht ein gerader Draht zu einer in der Erde vergrabenen Platte E. Dadurch ist die Maschine geschützt. Ebensolche Vorsichtsmaßregeln ergreift man bei den Transformatoren, bei den Motoren und auf der Fernleitung in gewissen Abständen. In Fig. 536 ist dargestellt, wie ein Lichtbogen in einem solchen Hörnerblitzableiter aussieht. Es ist dies eine Momentaufnahme. Die Fußpunkte der einzelnen Entladungen wandern rasch nach aufwärts, und in 2 Sekunden ist der Lichtbogen erloschen.

Fig. 535.

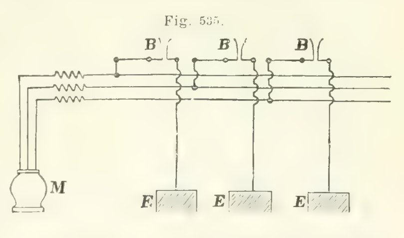
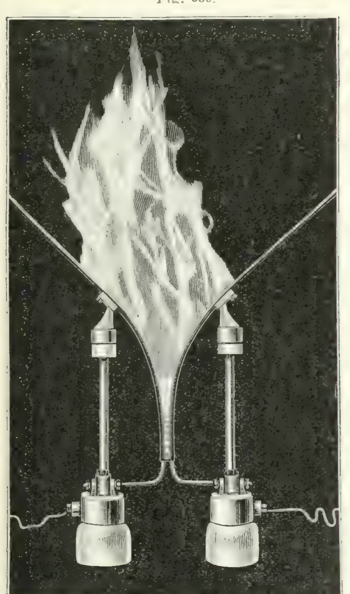



Fig. 536.



Die Kraftübertragungen auf größere Entfernung spielen jetzt bereits eine große Rolle in der Industrie, ja sie bilden in Verbindung mit der Verteilung der Kraft eine der wichtigsten Aufgaben der Industrie im allgemeinen und der Elektrotechnik im besonderen. Denn da es auf einfache Weise möglich ist, beliebig vielen Maschinen elektrisch von einer Stelle aus die Kraft zuzuführen, so ist dadurch eine eigentümliche Kombination von Zentralisierung und Dezentralisierung der Arbeit ermöglicht, für die es bisher kein Beispiel gab, die aber jetzt in manchen Industriegegenden schon praktisch durchgeführt wird. Bisher nämlich konnten nur die ganz großen Fabriken aller der Vorteile teilhaftig werden, welche einerseits sehr große Wasserkräfte, andererseits sehr große Dampfmaschinen bieten. Diese liefern ja die Kräfte außerordentlich viel billiger, um den dritten Teil bis zur Hälfte der Kosten, als kleine Turbinen, kleine Dampfmaschinen. Wo also große Maschinen, sei es von Dampf, sei es von Wasser getrieben, aufgestellt waren, da konnte sich, in nächster Nähe derselben, eine große Industrietätigkeit entwickeln, der Betrieb war ein rein zentralisierter. Jetzt aber ist es möglich, solche große Maschinen, solche große Wasserkräfte zu benutzen und auf elektrischem Wege diese Kräfte in weitem Umfange, auf viele Ortschaften zu verteilen, also die Vorteile der zentralisierten Krafterzeugung mit denen des dezentralisierten Kraftverbrauchs zu verbinden. So entstehen z. B. an der Oberspree, in Sachsen, in der Nähe des Rheinfalls, bei München große Industriegegenden, in welchen die Krafterzeugung auf eine Stelle konzentriert ist, während durch elektrische Kraftübertragung die Vorteile dieser konzentrierten Erzeugung allen einzelnen, selbst den kleinsten Industriellen zugute kommen. Es ist kein Zweifel, daß diese lebenskräftige Kombination sich allmählich immer weiter ausbreiten wird, und man kann daher ruhig, ohne von der Zukunft desavouiert zu werden, die Prophezeiung aussprechen, daß der elektrischen Kraftübertragung und Kraftverteilung immer mehr die Zukunft gehören wird.

Diese Verbindung von zentralisierter Erzeugung der elektrischen Energie und ihrer Verteilung auf große Flächen hat in den letzten Jahren in immer steigendem Maße zur Errichtung von Überlandzentralen geführt. Man bildet nicht mehr eine Industriegegend in der Nähe von großen Wasserkräften, sondern man überträgt die elektrische Energie durch hochgespannten Wechselstrom oder Drehstrom auf große Entfernungen und verteilt sie auf große Flächen und versorgt alle in dem Gebiet befindlichen Industrien mit ihr. Solche Überlandzentralen sind zunächst mit großem Erfolge in Oberschlesien und in Rheinland-Westfalen entstanden und diese versorgen Gebiete von mehr als 1500 Quadratkilometer mit elektrischen Strömen, die allen in diesem Gebiet ansässigen Industrieen, auch kleinen Betrieben, sowohl für Kraft wie für Beleuchtung wie auch zum Teil den Kleinbahnen zugute kommen. Man hat in den letzten Jahren eine größere Ausdehnung dieses Systems versucht, man hat solche Überlandzentralen an vielen Orten zum Teil ausgeführt, zum Teil geplant. Aber es hat sich gezeigt, daß ein wirtschaftlicher Erfolg derselben doch nur dann möglich ist, wenn in dem Gebiet

wenigstens mittlere Städte mit einigermaßen großem Bedarf an Elektrizität vorhanden sind. Die Ausdehnung dieser Betriebsform auf ausgedehnte Gebiete mit schwacher Industrie, selbst wenn auch die Landwirtschaft mit zu den Abnehmern des elektrischen Stromes gehört, hat sich bisher bloß da als vorteilhaft erwiesen, wo durch billige Wasserkräfte, ohne große Kosten des Ausbaus, eine sehr billige Stromerzeugung möglich ist.

---

9. Kapitel.

Die Verteilung elektrischer Energie.

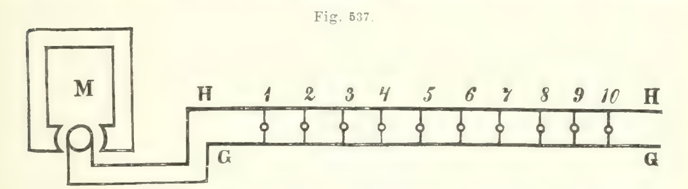
Mit der wachsenden Ausdehnung der Benutzung des elektrischen Stromes wuchsen auch in ungeahntem Maße die Anforderungen, welche an die Elektrotechnik gestellt wurden. War man anfangs schon zufrieden, wenn man in einzelnen Räumen einige Bogenlampen von einer Maschine aus treiben lassen konnte, so kam bald durch das elektrische Glühlicht die Forderung an die Elektrotechnik heran, eine größere oder kleinere Anzahl von Glühlampen so von einer Quelle aus mit Strom zu versorgen, daß jede Lampe unabhängig von der anderen wäre und beliebig, ohne die anderen zu stören, angezündet oder ausgelöscht werden könne. Dann sollten auch Bogenlampen und Glühlampen zusammen in demselben Kreise betrieben werden. Solange solche Betriebe sich auf einzelne Gebäude oder Räume erstreckten, waren diese Forderungen nicht allzu schwer zu erfüllen. Große Schwierigkeiten traten erst ein, als man daran ging, ganze Stadtteile, ja ganze Städte mit Bogenlicht und Glühlicht zu beleuchten, wobei immer die Forderung der gänzlichen Unabhängigkeit aller einzelnen Beleuchtungsobjekte obenan gestellt war. Zu diesen Forderungen trat dann bald noch die hinzu, den Strom nicht nur zu Beleuchtungszwecken, sondern auch zu Arbeitszwecken durch Elektromotoren und jetzt auch zu Heizzwecken zu liefern. Es mußten so direkte Methoden für die Verteilung der elektrischen Energie ausgearbeitet werden, welche mit den wachsenden Anforderungen auch immer schwieriger und komplizierter wurden.

Eine Reihe von Bogenlampen von derselben Maschine zu speisen, bot nach Erfindung der Differentiallampe keine erheblichen Schwierigkeiten mehr. Man schaltet die Bogenlampen hintereinander in einen Kreis, und durch die feine Regulierung der Differentiallampe ist jede Lampe unabhängig von der anderen. Allerdings wird bei einer Anzahl hintereinander geschalteter Bogenlampen die notwendige Spannung des Stromes bald sehr groß. Da jede Bogenlampe etwa 45 Volt Spannung an ihren Klemmen gebraucht, so muß ein Strom, der 20 Bogenlampen hintereinander speisen soll, schon etwa 1000 Volt Spannung haben, wenn man den Spannungsverlust in der Leitung berücksichtigt. Mit Gleichstrommaschinen und namentlich mit Wechselstrommaschinen lassen sich solche Spannungen jetzt sicher erzielen, und die billigste und einfachste Art, eine Reihe von Bogenlampen allein zu treiben, ist daher die der Hintereinanderschaltung. Sie ist anwendbar vor allem immer dann, wenn jede Gefahr, daß Unberufene die Leitungsdrähte berühren können, ausgeschlossen ist. Sie ist aber nicht anwendbar, wenn die hochgespannten Ströme in bewohnte Räume eingeführt werden müssen, da sie dann zu Unglücksfällen führen könnte.

Die Frage nach der zweckmäßigen Verteilung der Elektrizität auf viele einzelne Verbrauchsstellen wurde aber erst dringend durch die Glühlichtbeleuchtung. Beim Glühlicht, das ja die einzelnen Wohnungen beleuchten soll, ist eine große Anzahl von Benutzern (Abonnenten) vorhanden, von denen einer um den anderen sich nicht zu kümmern hat, und jeder will immer genau so viel Lampen löschen oder brennen können, als er gerade braucht, ohne nach seinem Nachbar zu fragen. Es mußte also die volle Unabhängigkeit jeder Lampe von der anderen hervorgebracht werden, während sie alle in einem Stromkreise sich befinden, d. h. von einer Maschinenstation aus gespeist werden.

Edison selbst war es, der sofort bei der Einführung des Glühlichts auch die praktische Lösung für diese Verteilung fand. Er schaltete nämlich die Lampen alle nebeneinander (parallel), also so, wie es in Fig. 537 gezeichnet ist, in welcher M die Maschine und 1, 2, 3 bis 10 die Lampen sind. Haben die Leitungsdrähte G G, H H (welche man ja beliebig stark nehmen kann) einen sehr kleinen Widerstand, der in der folgenden

Fig. 537.



Betrachtung vernachlässigt werden möge, dann herrscht an den Enden jeder Lampe dieselbe Spannungsdifferenz, nämlich diejenige, welche an den Endklemmen der Maschine vorhanden ist. Die Leitungen von den Endklemmen der Maschine bis zu den letzten Lampen macht man dabei so dick, gibt ihnen einen so geringen Widerstand, daß der Spannungsverlust (Produkt aus der Stromstärke und dem Widerstand) nur 2 bis 3 Proz. beträgt. Solange daher die Spannungsdifferenz an den Enden der Maschine (die Klemmenspannung) dieselbe bleibt, solange ist auch die Stromstärke in jedem Zweig, in jeder Lampe, da deren Widerstand unverändert ist, dieselbe, solange brennt also jede Lampe normal und unveränderlich. Und daraus ergibt sich, daß alle Lampen vollständig unabhängig voneinander sind, daß man beliebig viele auslöschen oder einschalten kann, wenn nur dafür gesorgt wird, daß die Klemmenspannung an den Enden der Maschine dauernd dieselbe bleibt.

Diese Lösung der Aufgabe läßt sich aber sofort auch auf den Fall erweitern, daß der Strom von der Maschine nicht nur zum Betrieb von Glühlampen benutzt werden soll, sondern daß er auch zum Betrieb von elektrischen Motoren verwendet werden soll. Schaltet man in Fig. 537 an Stelle der Lampen 1, 2 bis 10 je einen elektrischen Motor ein und hält man an den Enden der Maschine die Spannung dauernd konstant, so fließt durch jeden Motor ein Strom von der Stärke, wie er der von ihm geleisteten Arbeit entspricht. Aber jeder Motor ist dabei ganz unabhängig von dem anderen. Die konstante Klemmenspannung ist hinreichend, aber auch notwendig, um alle Forderungen des gemischten Betriebes

von Glühlampen und Motoren zu erfüllen. Natürlich müssen die Motoren so konstruiert sein, muß der Widerstand ihrer Wickelung so abgemessen sein, daß sie bei der konstant gegebenen Klemmenspannung die maximale von ihnen verlangte Arbeit leisten können. Ebenso können auch an Stelle der Lampen 1 bis 10 Heizapparate eingeschaltet werden, die auch für konstante Klemmenspannung konstruiert werden.

Bei diesem System der Parallelschaltung aller Verbrauchsapparate ist es nun notwendig, daß man eine normale Spannungsdifferenz festsetzt, welche in dem Leitungssystem herrschen soll. Denn es müssen eben alle Glühlampen, Motoren und Heizapparate so konstruiert sein, ihr Widerstand muß so abgemessen sein, daß sie bei der gegebenen Spannung gerade die zu ihrem normalen Betriebe nötige Stromstärke erhalten.

Es hat sich nun zunächst eingebürgert, bei Gleichströmen eine Spannungsdifferenz von zirka 110 Volt (100 bis 120 Volt) in den Hauptleitungen anzuwenden (in manchen Städten eine solche von 220 Volt). Die Glühlampen für große Anlagen werden also so konstruiert, daß sie bei dieser Spannung gerade die normale Lichtstärke (gewöhnlich von 16 oder 25 Kerzen) geben, und ebenso werden auch die Motoren und die Heizapparate für diese Spannung eingerichtet. Zwischen zwei solche Leiter, die 110 Volt Spannungsdifferenz haben, kann man nun auch Bogenlampen einschalten. Denn da eine Bogenlampe zirka 45 Volt Spannung braucht, so kann man immer 2 Bogenlampen hintereinander mit einem Widerstand zwischen die Leitungsstränge schalten, und auch diese erhalten dann ihren normalen Strom. Ebenso kann man aber auch Glühlampen von geringer Leuchtkraft, die weniger Spannung bedürfen und vertragen, zwischen die Leitungen von 110 Volt Spannungsdifferenz einschalten. Nur muß man von diesen eben so viel hintereinander schalten, daß die Summe ihrer Spannungen etwa 110 Volt ausmacht, also z. B. 4 Glühlampen von 27 Volt, oder 14 Glühlampen von 8 Volt.

Dieses System der Parallelschaltung ist also ganz ausgezeichnet geeignet, eine Verteilung der elektrischen Energie zu liefern, die allen Anforderungen entspricht.

Die Hauptforderung dabei ist, daß die Klemmenspannung an der erzeugenden Maschine dauernd konstant erhalten wird. Zu dem Zwecke muß der Maschinist an einem Voltmeter die Spannung dauernd kontrollieren und muß durch Regulierung des Nebenschlusses an der Maschine die Spannung sofort wieder auf den normalen, vorgeschriebenen Wert bringen, wenn sie sich verändert.

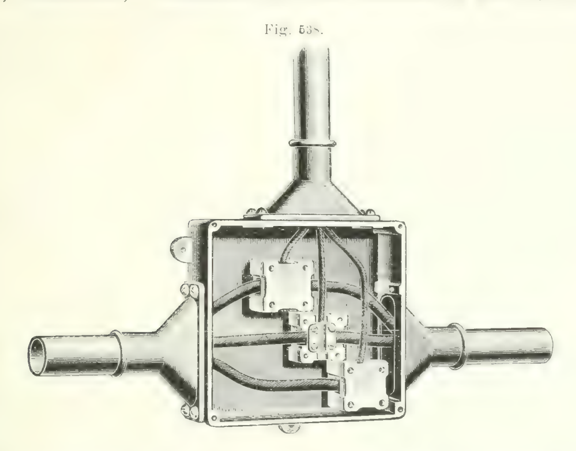
Die Einschaltung der Widerstände in den Nebenschluß wird übrigens nicht immer durch den Maschinisten mit der Hand bewirkt, sondern geschieht zuweilen selbsttätig, durch geeignete, von den Strömen erregte Elektromotoren.

Ferner wird die Erzeugung einer großen Menge von Elektrizität, die sich auf sehr viele Gebrauchsapparate verteilt, zweckmäßig nicht von einer einzelnen Dynamomaschine besorgt, sondern von mehreren, die man nach Bedarf einschaltet. Denn der Bedarf an Elektrizität ist bei der Verteilung der Elektrizität ein sehr wechselnder. Die Lampen brennen größtenteils nur des Abends und während eines Teiles der Nacht, die Motoren laufen hauptsächlich während des Tages. Man stellt des-

wegen in den Zentralstationen mehrere Maschinen auf, von denen jede nur einen Strom von einer gewissen Maximalstärke liefert, und erst wenn mehr Strom gebraucht wird, als diese eine Maschine liefert, schaltet man eine zweite, dritte Maschine ein. Diese Maschinen werden immer parallel geschaltet, und zu dieser allmählichen Einschaltung, von der die Konsumenten nichts merken dürfen — es darf sich z. B. die Lichtstärke der Lampen nicht vergrößern noch verringern —, gehören besondere Einrichtungen, die wir aber nicht erörtern können.

Von der Dynamomaschine aus oder, besser gesagt, von ihren beiden Polen gehen nun zunächst Drähte (oder Kabel) zu einer Schalttafel im Maschinenhaus, welche alle notwendigen Apparate, Voltmeter, Amperemeter, Ausschalter, Widerstände für den Nebenschluß und den Haupt-

Fig. 538.



strom, Sicherungen u. s. w. enthält. Sind in der Zentralstation mehrere Maschinen vorhanden, so werden deren Pole alle durch je einen Ausschalter hindurch mit zwei Schienen auf der Schalttafel, den sogenannten Sammelschienen, verbunden, so daß dadurch die Maschinen alle parallel geschaltet sind. Von den Sammelschienen geht nun eine doppelte Hauptleitung durch die Stadt, welche unterirdisch gelegt ist und welche aus Kabeln von großem Querschnitt besteht, da sie die starken Hauptströme zu führen hat. In jede Straße gehen nun wieder Kabel von geringerem Querschnitt, und zwar von jedem Hauptkabel aus eines. Noch geringeren Querschnitt haben die Leitungen, die in die Nebenstraßen führen, und endlich noch kleineren diejenigen, die in die einzelnen Häuser führen. Die Einrichtung ist also ganz analog wie bei der Gasleitungseinrichtung.

Für diese Leitungen verwendet man jetzt häufig Kabel, die aus einer inneren Kupferseele und einem konzentrischen, aus Drähten gebildeten Kupferleiter bestehen, so daß die eine Leitung ganz von der anderen umgeben ist. Es sind also dann beide Leitungen in demselben Kabel

enthalten. Der äußere Leiter ist mit Isolationsmasse umgeben, und über der Isolationsmasse befindet sich ein Bleimantel und darüber häufig noch eine sogenannte Eisenarmierung, d. h. eine Hülle aus Eisenband. Für Drehströme braucht man natürlich drei Kabel.

Die Abzweigungen von den Hauptkabeln, sowie die von den Nebenkabeln und endlich die Lampen und Motoren jedes einzelnen Hauses sind alle nebeneinander geschaltet. Da, wo die Nebenleitungen von den Hauptleitungen abgezweigt werden, werden Abzweigkasten angewendet, welche diese Abzweigungsstellen enthalten. Fig. 538 zeigt einen solchen Abzweigkasten für eine Drehstromleitung. In dem Kasten findet die Abzweigung der Nebenleitungen von den Hauptleitungen statt. Die drei Kabel für die Drehströme liegen rechts und links in Stahlrohren und diese werden durch Stutzen in den Abzweigkasten eingeführt. Die Abzweigung selbst geschieht im Kasten an Porzellanscheiben durch Klemmen. Die drei abgezweigten Kabel werden oben oder unten durch ein Stahlrohr hinausgeführt.

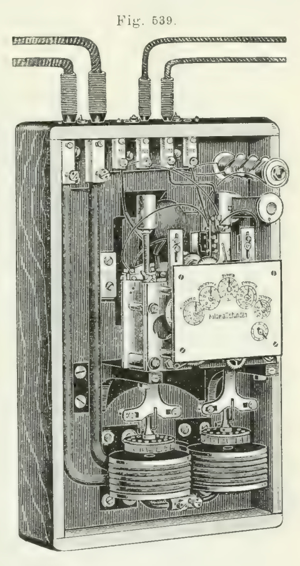
Wenn auf diese Weise die elektrische Energie mit Sicherheit verteilt wird und jeder Konsument infolge der Parallelschaltung mit konstanter Spannung unabhängig von allen anderen ist, so ist nur noch eine Sache von höchster Bedeutung. Es muß nämlich jeder Konsument wissen, wieviel Elektrizität er verbraucht hat, und es muß auch die Gesellschaft, die die Elektrizität liefert, wissen, wieviel Elektrizität etwa in jeder Wohnung, die elektrisch beleuchtet ist, konsumiert worden ist, weil sich danach der zu zahlende Preis richtet. Es handelt sich also um die Anbringung von Elektrizitätsmessern.

Solche Elektrizitätszähler oder Verbrauchszähler kann man auf verschiedene Weise konstruieren. Die Aufgabe ist, die in einer bestimmten Anlage, etwa in einer Wohnung, während einer gewissen Zeit (etwa 1 Monat) konsumierte elektrische Energie zu messen. In jeder Sekunde leistet nun ein elektrischer Strom eine Arbeit, welche gleich dem Produkt seiner Spannung (in Volt) und seiner Stromstärke (in Ampere) ist. Die Zahl der Watt (Volt-Ampere) eines Stromes gibt also die in jeder Sekunde vom Strom geleistete, also zugleich die vom Konsumenten verbrauchte elektrische Energie an. Diese mit der ganzen Verbrauchszeit multipliziert, gibt die gesamte verbrauchte Energie. Die Verbrauchszeit wird gewöhnlich in Stunden gerechnet, und daher ist die Zahl der Wattstunden dasjenige, was der Verbrauchsmesser konstatieren soll. Wäre die Spannung des Verteilungsnetzes durchaus konstant, sagen wir 110 Volt, so brauchte der Verbrauchszähler nur die Zahl der Amperestunden zu messen (Produkt aus der Stromstärke und der Zeit). Denn diese Zahl der Amperestunden mit 110 multipliziert, gibt dann die Zahl der Wattstunden. Gewöhnlich aber ist die Spannung der Anlagen nicht so absolut konstant und es müssen daher Apparate benutzt werden, die direkt die Wattstunden messen, weil das diejenige Größe ist, für deren Lieferung die Gesellschaft einen Geldaufwand, meistens in Form von Kohlenverbrennung, zu machen hat und die daher der Konsument nach festgesetztem Einheitspreis zu bezahlen hat.

Der Wattstundenzähler von Aron mißt die Wattstunden dadurch, daß er das Produkt aus den Ampere und den Volt, also die Watt

durch die Kraft bestimmt, welche zwei stromdurchflossene Rollen aufeinander ausüben, und die Zeit zugleich durch ein Pendel mißt. Zu dem Zweck sind in dem Apparat (Fig. 539) zwei Pendel angebracht von gleicher Länge und gleichem Gewicht, von denen jedes auf ein Uhrwerk wirkt. Wenn die beiden Pendel nur unter dem Einfluß der Erdschwere schwingen, wie es gewöhnlich der Fall ist, so gehen beide gleich rasch, die beiden Uhrwerke haben dasselbe Tempo. Mit den beiden Uhrwerken ist nun ein Zeiger so verbunden, daß er nur durch die Differenz ihrer Geschwindigkeiten in Bewegung versetzt wird. Solange also nur die Erdschwere auf beide Pendel wirkt, bewegt sich der Zeiger nicht, trotzdem beide Pendel schwingen. Nun wird aber das Ende jedes der beiden Pendel aus einer Drahtrolle aus feinem Draht gebildet und unterhalb jeder dieser Drahtrollen befindet sich, fest aufgestellt, je eine Drahtrolle aus dickem Draht. Fließt nun durch die untere und die obere dieser Rollen je ein Strom hindurch, so wirken diese ja aufeinander mit einer Kraft, die von dem Produkt der Stromstärken abhängt und die wir als elektrodynamische Kraft früher (S. 204) kennen gelernt haben. Die Pendel stehen jetzt also unter der Wirkung zweier Kräfte, nämlich der Erdschwere und der elektrodynamischen Kraft der Ströme, und ihre Schwingungsdauer ist dadurch geändert. Die Schaltung ist aber so gemacht, daß das eine Pendel durch den Strom beschleunigt, das andere verzögert wird. Dadurch kommt nun der Zeiger in Bewegung und man sieht leicht ein, daß sein Weg gerade von dem Produkt aus den beiden Stromstärken (oben und unten) und der Dauer des Stromes abhängt.

Fig. 539.

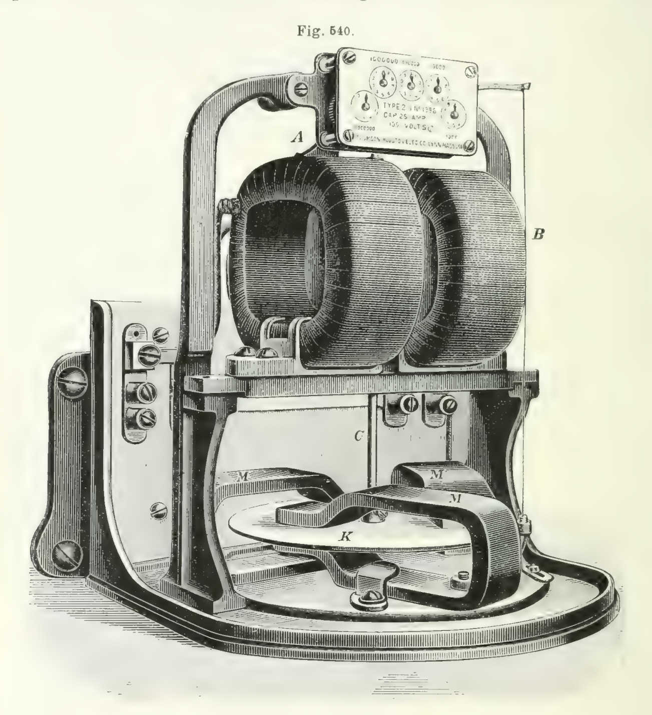


Durch die beiden festen Rollen wird nun der Hauptstrom selbst geschickt, die beweglichen Rollen aber sind direkt zwischen die beiden Hauptleitungen des Hauses eingeschaltet. Da nun ihr Widerstand unveränderlich ist, so ist der Strom, der die bewegliche Rolle durchfließt, nur abhängig von der Spannung zwischen den Hauptleitern und daher ist die elektrodynamische Kraft zwischen den beiden Rollen von dem Produkt der Spannung und der Stromstärke, also direkt von den zu messenden Watt abhängig. Das Differentialuhrwerk mißt daher das Produkt aus den Watt und der Zeit, also die Wattstunden. Die Zifferblätter geben direkt die Energie und zwar die Kilowattstunden an, indem das erste die Tausender, das zweite die Hunderter u. s. w., das letzte die Zehntel der Kilowattstunden zeigt. Zugleich sieht man, daß dieses Instrument nicht bloß für Gleichstrom, sondern auch für Wechselstrom geeignet ist. Denn die Kraft zwischen den Strömen

in den beiden Rollen ist dieselbe. wenn der Strom in beiden zugleich umgekehrt wird.

Ein anderer sehr brauchbarer und verbreiteter Elektrizitätszähler, der aus Amerika herübergekommen ist, ist der Thomson-Houston-Zähler. Er gehört zu der Klasse der sogenannten Motorzähler. Man sieht die innere Einrichtung desselben in Fig. 540. Der Zähler ist ein Elektromotor ohne Eisen, der eine Kupferscheibe zwischen Magnetpolen dreht. An Stelle der Feldmagnete eines Elektromotors sieht

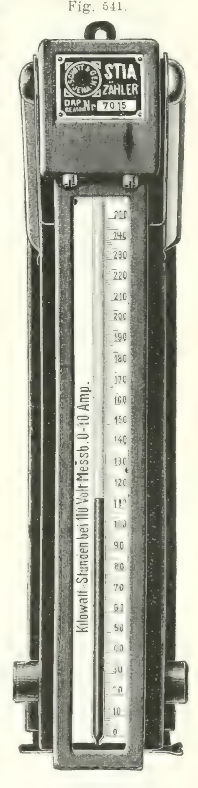
Fig. 540.



man hier zwei Spulen A und B von dickem Draht, durch welche der Hauptstrom geleitet wird. Zwischen ihnen befindet sich der Anker, auch ohne Eisen, aber in Form einer Trommel gewickelt, mit vertikaler Achse C. Die Trommelwickelung wird zwischen die Leitungen eingeschaltet, zwischen denen die betreffende Spannung herrscht, und es wird vor sie noch ein Widerstand vorgeschaltet. Ihr Strom ist aber proportional der Spannung. Die Trommel kommt in Drehung und würde ihre Geschwindigkeit immer weiter steigern, wenn nicht die eingeleitete Energie zur Leistung einer Arbeit verbraucht würde. Diese Arbeit besteht in der Drehung der unten

sichtbaren Kupferscheibe K zwischen den Polen der drei Hufeisenmagnete M M M. Der Anker und die Scheibe kommen also in gleichmäßige Drehung und treiben dadurch mittels Zähnen die Räder, welche ihre Zeiger auf den Zifferblättern oben haben, an denen man nun direkt Wattstunden abliest, wenn der Apparat auf diese abgeglichen ist. Das geschieht durch Veränderung des Vorschaltwiderstandes oder durch Lagenänderungen der Magnetpole. Der Apparat ist mit einem Kasten umgeben, welcher nur die Zifferblätter freiläßt. Für Wechselströme und Drehströme wird ein ähnlicher Apparat mit einem Induktionsmotor (S. 528) benutzt.

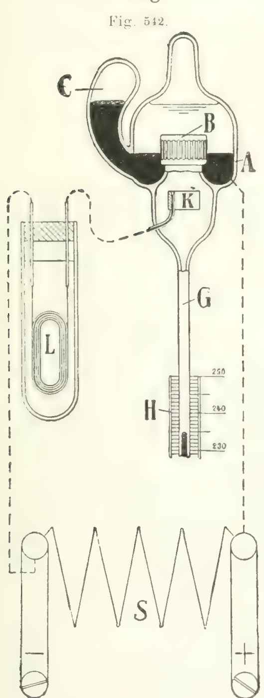
Fig. 541.



Auf gleichen oder ähnlichen Prinzipien beruhen die meisten sonst in Gebrauch stehenden Elektrizitätszähler.

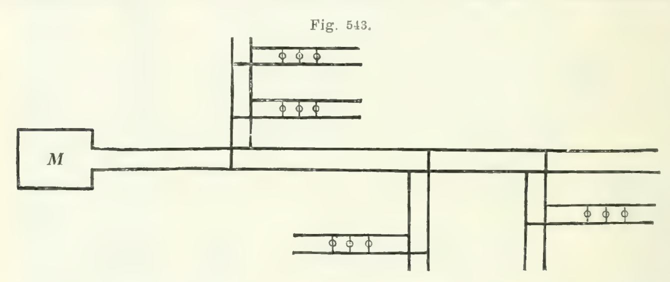
Die Genauigkeit dieser Zähler ist keine sehr erhebliche. Selbst gesetzlich ist die Fehlergrenze der Zähler bei voller Belastung (d. h. wenn sie den Maximalstrom erhalten, für den sie konstruiert sind) zu 6 Proz. zugelassen und bei kleinerer Belastung ist infolgedessen die prozentische Genauigkeit eine noch geringere. Da durch Einführung der Metallfadenlampen der Stromverbrauch in den meisten Haushaltungen jetzt ein geringerer geworden ist, so ist die prozentische Richtigkeit der Zählerangaben häufig ziemlich zweifelhaft. Ein neuer Zähler, der von dem Glaswerk Schott und Gen. in Jena unter dem Namen Stiazähler verbreitet wird, hat den Vorteil, daß er bei allen Belastungen mit derselben Genauigkeit zählt, so daß bei Vollbelastung und bei ganz geringer Belastung der Fehler immer nur etwa 2 Proz. beträgt. Allerdings mißt der Zähler nicht die Wattstunden, sondern nur die Amperestunden, und nur unter der Annahme, daß die Spannung konstant geblieben ist, lassen sich aus der Angabe des Zählers auch die Wattstunden entnehmen. Der Stiazähler,

Fig. 542.



dessen Ansicht Fig. 541 gibt, ist ein Quecksilbervoltameter, bei welchem die gesamte abgeschiedene Menge Quecksilber abgelesen wird. Da diese von den Amperestunden abhängt, die durch die Zelle gegangen sind, so mißt der Zähler zunächst diese. Die Einrichtung des Zählers ist durch Fig. 542 gegeben. Ein Glasgefäß A C aus Jenaer Glas enthält in einer Kammer, die durch einen kleinen Wall von Glasstäben B innen begrenzt ist, Quecksilber (schwarz gezeichnet). Über dem Quecksilber und in dem unteren Teil des Gefäßes befindet sich die elektrolytische Flüssigkeit, welche aus einer wäßrigen Lösung von Quecksilberjodid und Jodkalium besteht, so daß auf 1 Liter 225 g Quecksilberjodid und 750 g Jodkalium kommen. Bei K befindet sich die Kathode, ein Iridiumblech. Geht ein Strom durch die Zelle vom Quecksilber zum Iridium, so scheidet sich am Iridium Quecksilber ab, welches in feinen Tröpfchen in das kalibrierte Meßrohr G fließt und dessen Höhe in dem Rohr an der Skala H abgelesen wird. Durch das Instrument geht nicht der zu messende Strom selbst, sondern ein bekannter Bruchteil desselben, indem das Instrument an die Enden eines kleinen Konstantanwiderstandes S, parallel zu ihm, geschaltet wird. Vor das Instrument ist noch ein Vorschaltwider-

Fig. 543.



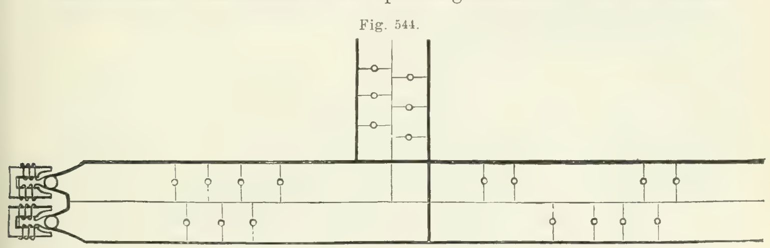
stand L aus Nickeldraht geschaltet. Bei höherer Temperatur nimmt der Widerstand des Nickeldrahtes um ebensoviel zu, als der der Zelle abnimmt, so daß die beiden Zweige der Parallelschaltung immer dasselbe Widerstandsverhältnis haben. Beim Stromdurchgang wird die Flüssigkeit an der Kathode leichter, an der Anode schwerer, so daß, da die Kathode absichtlich unterhalb der Anode angebracht ist, von selbst Strömungen in der Flüssigkeit stattfinden, die die Gleichheit der Konzentration wieder herstellen. Wenn das Meßrohr mit Quecksilber gefüllt ist, muß der Zähler gekippt werden, so daß das Quecksilber wieder in das Gefäß A zurückfließt. Diese bequemen und genauen Zähler führen sich seit kurzer Zeit immer mehr ein.

Bisher hatten wir immer angenommen, daß die Zuleitung des Stromes von der Zentrale nach den einzelnen Verbrauchsstellen so geschieht, daß von der Maschine die beiden Hauptleiter, von etwa 110 Volt Spannung, ausgehen, daß von diesen sich für die einzelnen Straßen oder Häuserkomplexe wieder je zwei Leiter abzweigen und so weiter. Das Schema dieser Leitungsführung ist in Fig. 543 angegeben. Man nennt dieses System das Zweileitersystem.

Dieses System ist zwar das einfachste und übersichtlichste, aber zugleich für größere Entfernungen ein sehr teures. Denn da die Hauptleitungen den Strom für alle Verbrauchsapparate führen müssen, also sehr große Stromstärken vertragen müssen, so müssen sie außerordentlich geringen Widerstand haben, damit einerseits nicht zu viel Joulesche Wärme entwickelt wird und damit andererseits der Spannungsverlust vom Anfang der Leitung bis zum Ende ein geringer ist, wie er es bei dem System der Parallelschaltung auch nur sein darf. Daher muß man sehr dicke Kupferstäbe als Leitungen nehmen, und es hat sich gezeigt, daß man nicht mehr ökonomisch mit dieser Verteilung arbeiten kann, wenn die letzte Lampe mehr als 800 m von der Maschine entfernt ist. Das Zweileitersystem eignet sich also nur für Bezirke bis zu 800 m Radius.

Um größere Bezirke mit Strom versorgen zu können, gingen Edison und Hopkinson zu einer Kombination über, die sich als sehr vorteilhaft erwiesen hat und die man das Dreileitersystem nennt. Bei diesem werden in der Zentrale zwei Maschinen, die je 110 Volt Spannung an ihren Klemmen haben, hintereinander geschaltet, so daß an ihren äußeren Klemmen 220 Volt Spannung herrschen. Von den beiden

Fig. 544.



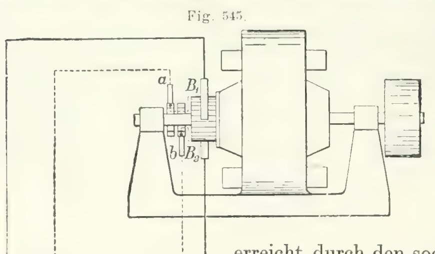
Endklemmen, aber auch von den miteinander verbundenen Mittelklemmen geht nun je eine Leitung durch die Stadt. Die mittlere Leitung nennt man die Kompensationsleitung. Zwischen die Mittelleitung und die eine resp. die andere der Hauptleitungen werden nun die Lampen, Motoren etc. parallel geschaltet, wie es Fig. 544 zeigt, so daß diese an ihren Enden doch nur 110 Volt Spannung besitzen. Aber die beiden Hauptleitungen können jetzt, da sie die Verbrauchsenergie bei doppelter Spannung also halber Stromstärke führen, geringeren Querschnitt haben. Allerdings kommen noch die Kosten der doppelten Maschine, der Mittelleitung und der größeren Zahl von Regulierungs- und Meßapparaten hinzu, so daß dieses System sich doch nur für eine Fläche bis zu 1200 m Radius als vorteilhaft erweist. Dabei konstruiert man übrigens jetzt häufig die Elektromotoren für 220 Volt Spannung, so daß man diese direkt zwischen die beiden Außenleiter einschaltet. Man bemüht sich auch, Glühlampen für 220 Volt herzustellen, doch bisher noch ohne viel Erfolg. Nur die Nernstlampen werden leicht für 220 Volt konstruiert.

Bei diesen Stromverteilungen werden die Maschinen möglichst in der Mitte des Netzes aufgestellt, welches mit Strom zu versorgen ist. Gewöhnlich wird jetzt auch noch in dem Maschinenhaus eine Akku-

mulatorenbatterie aufgestellt, wodurch, da die Akkumulatoren in den Zeiten des geringsten Strombedarfs geladen werden, eine rationelle Ausnutzung der Maschinenanlage möglich ist, die auch an sich dadurch kleiner gewählt werden kann.

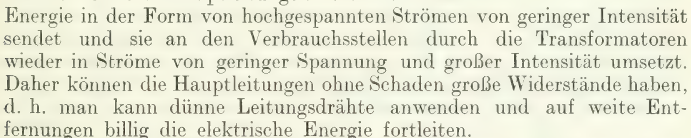
Beim Dreileitersystem, das bei einigermaßen großen Anlagen mit Gleichstrom jetzt immer gewählt wird, braucht man zunächst zwei Dynamomaschinen für je 110 Volt Spannung. Man kann aber auch statt dessen eine Akkumulatorenbatterie von 220 Volt Spannung mit einer einzigen Dynamomaschine für 220 Volt Spannung anwenden. Dann läßt man nämlich die Akkumulatoren von der Maschine laden und führt von den Endklemmen der beiden äußersten Akkumulatorzellen und von der mittelsten Zelle aus die drei Drähte durch die Stadt. Man hat sich vielfach bemüht, bei dem Dreileitersystem auch in Fällen, wo keine Akkumulatorenbatterie vorhanden ist, mit einer einzigen Dynamomaschine von 220 Volt auszukommen. Das wird sicher und ohne große Verteuerung der Maschinen erreicht durch den sogenannten Spannungsteiler, der von der Allgemeinen Elektrizitäts-Gesellschaft (A.E.G.) in Berlin konstruiert wird. Es werden nämlich bei einer gewöhnlichen Gleichstrommaschine für 220 Volt zwei einander gerade gegenüberliegende Spulen des Ankers (Trommel oder Ring) verbunden mit zwei Schleifringen auf der Achse, an welchen Bürsten schleifen. Wir wissen, daß in jeder einzelnen Spule bei der Rotation Wechselströme erzeugt werden. Es gehen daher auch von den Bürsten bei dieser Anordnung Wechselströme aus. Diese werden nun durch eine feststehende Rolle von hoher Selbstinduktion geleitet, welche am besten auf einen Eisenring aufgewickelt ist (eine Drosselspule). Wegen der hohen Selbstinduktion ist der Strom in dieser Leitung immer gering. In der mittelsten Windung dieser Rolle herrscht aber eine Spannung, welche immer gerade in der Mitte zwischen den Spannungen der Endklemmen der Maschine liegt. Haben also die beiden Endklemmen die Spannungen + 100 Volt und — 100 Volt, so herrscht an dieser Stelle gerade die Spannung 0 Volt. An diesen Punkt kann man nun den Mittelleiter im Dreileitersystem ohne weiteres anlegen. Fig. 545 zeigt diese Anordnung. Man sieht oben die Gleichstrommaschine mit ihrem gewöhnlichen Kommutator, an dem die Bürsten B_1 und B_2 schleifen. Außerdem sieht man die Schleifringe mit den Bürsten a und b, von denen der Wechselstrom zu dem Spannungsteiler S geht. An den Punkt 0 dieses Apparats wird der

Fig. 545.



Mittelleiter N angelegt, während die beiden äußeren Leiter L_1 und L_2 von den Bürsten B_1 und B_2 ausgehen. Die Ansicht eines solchen Spannungsteilers, der wie ein Transformator gebaut ist und keine Bedienung braucht, da er keine beweglichen Teile enthält, zeigt Fig. 546. Die Siemens-Schuckertwerke bauen Dreileiterdynamos, bei denen ohne besondere Nebenapparate durch Zusatzwicklung im Anker die Spannungsteilung bewirkt wird. Das Dreileitersystem ist äußerst bequem für die Verteilung der Energie, und ist auch, wie erwähnt, bis zu Entfernungen von 1200 m rings um die Zentrale noch praktisch. Will man größere Bezirke mit Gleichstrom versorgen, so muß man mehrere Zentralen errichten, wie es z. B. in Berlin der Fall ist, oder man muß Unterstationen einführen, in denen Akkumulatorenbatterien stehen, die nun selbst wieder ihren Bezirk mit Strom versorgen.

Fig. 546.



Vorteilhafter aber tritt für solche größere Entfernungen zwischen der Zentralstation und den Verbrauchsapparaten das System der Wechselströme oder Drehströme in Verbindung mit Transformatoren ein.

Der große Vorzug der Anwendung von Wechselströmen mit Transformatoren beruht darin, daß man durch die Hauptleitungen die elektrische Energie in der Form von hochgespannten Strömen von geringer Intensität sendet und sie an den Verbrauchsstellen durch die Transformatoren wieder in Ströme von geringer Spannung und großer Intensität umsetzt. Daher können die Hauptleitungen ohne Schaden große Widerstände haben, d. h. man kann dünne Leitungsdrähte anwenden und auf weite Entfernungen billig die elektrische Energie fortleiten.

Die einzelnen Verbrauchsapparate, alle Lampen, Motoren müssen natürlich auch da unabhängig voneinander sein und müssen mit geringen Spannungen, gewöhnlich 110 Volt, arbeiten, wie beim gewöhnlichen Zweileitersystem.

Diese Forderungen werden dadurch erfüllt, daß man alle Transformatoren, d. h. deren primäre Wickelungen, zwischen die Hauptleitungen parallel schaltet.

Bei dieser Stromverteilung wird also an irgend einer Stelle, die auch ganz außerhalb des Bezirks liegen kann, welcher mit Strom versorgt wird, eine Maschine für gewöhnlichen Wechselstrom oder für Drehstrom aufgestellt. Ist die zu liefernde Energie sehr groß, so stellt man mehrere Maschinen auf, die alle parallel geschaltet werden, was zwar früher ziemliche Schwierigkeiten machte, jetzt aber sich in sicherer Weise bewerkstelligen läßt. Die Ströme dieser Maschinen sendet man in die Hauptleitungen und zwar hat man bei einphasigem Wechselstrom zwei Hauptleitungen, bei Drehstrom aber drei Leitungen anzuwenden. Diese dritte Leitung scheint dem Drehstrom als Mangel gegenüber dem reinen Wechselstrom anzuhaften. Indessen ist das nicht der Fall. Die drei Leitungen für Drehstrom brauchen nämlich bei gleicher zu übertragender Energie nicht dicker zu sein, als die zwei für Wechselstrom. Das für die Leitung benötigte Kupfergewicht ist also das gleiche. Es ist nur die dritte

Leitungsführung, welche bei der Drehstromleitung verteuernd wirkt, ein Nachteil, der aber durch die sonstigen Vorzüge des Drehstroms weit überwogen wird. Man verwendet für die Hauptleitungen Ströme von 1000 bis 5000, ja auch bis 10 000 Volt Spannung, in Ausnahmefällen sogar noch mehr.

Die Hauptleitungen, die den hochgespannten Strom führen, werden entweder durch die Luft geführt oder unterirdisch verlegt. In letzterem Falle werden konzentrische Kabel angewendet, bei denen die eine Leitung die andere umgibt, im ersteren Falle werden die Drähte auf Stangen durch Isolatoren befestigt. Trotz der hohen Spannungen genügt diese Isolation meistenteils. So werden die Hauptleitungen von der Zentrale aus durch alle diejenigen Bezirke hindurchgeführt, welchen Strom zugeführt werden soll. In jedem solchen Bezirk gehen nun von den Hauptleitungen Abzweigungen ab, welche zu je einem Transformator geführt werden, und zwar werden, wie gesagt, alle Transformatoren parallel geschaltet. Die Transformatoren werden bei Luftleitungen gewöhnlich in besondere Häuschen gestellt. Bei unterirdischen Leitungen werden sie in Keller gelegt. In jedem Falle werden die Transformatoren ebenso wie die Hauptleitungen so angebracht, daß sie für Unberufene nicht zugänglich sind, eben wegen der hohen Spannung des Stromes.

In dem Transformator wird nun die Energie des Stromes so transformiert, daß derselbe an den Enden der sekundären Klemmen nur niedrige Spannung hat, gewöhnlich 100 bis 110 Volt. Der Strom, der aus den sekundären Klemmen herauskommt, ist nun derjenige, welcher zum eigentlichen Verbrauch dient, und zwar wird natürlich hierbei die bewährte P a r a l l e l s c h a l t u n g angewendet. Von den Endklemmen der sekundären Leitungen gehen also zwei (oder auch von den Endklemmen und der Mittelklemme drei) parallele Hauptdrähte aus, die je 110 Volt Spannungsdifferenz haben, sie führen durch den Bezirk hindurch und zwischen sie werden alle Lampen, sowohl Glühlampen als Bogenlampen, und alle Motoren und Heizapparate parallel geschaltet. Da für jeden Bezirk ein eigener Transformator vorhanden ist, so haben die Leitungen für diese starken Nutzströme nur geringe Länge und gerade daraus resultiert die wesentliche Ersparnis in den Anlagekosten bei diesem System. Bei Drehströmen mit ihren drei Leitungen werden die Lampen zwischen je zwei Leitungen eingeschaltet, während die Drehstrommotoren drei Leitungen brauchen, von denen je eine von jeder der drei Hauptleitungen abgezweigt wird.

Der eine Übelstand dieses Verteilungssystems besteht darin, daß die Transformatoren (ihre primären Wickelungen) auch vom Strom durchflossen werden müssen, selbst wenn in der sekundären Leitung gar kein Strom gebraucht wird. Da nun das Ummagnetisieren des Ringes immer Arbeit verbraucht, so muß diese Arbeit also während der ganzen 24 Stunden des Tages geleistet werden, während der Strombedarf nur an zirka 6 Stunden stattfindet. Dadurch wird ein ziemlich erheblicher Prozentsatz der elektrischen Energie nutzlos verbraucht. Ein zweiter sehr erheblicher Übelstand des Wechselstromsystems ist der, daß es keine Akkumulatoren für Wechselstrom gibt. Deswegen müssen die großen Maschinen Tag und Nacht arbeiten, obwohl der Verbrauch ja nur zu gewissen Stunden ein erheblicher ist. Bei Gleichströmen kann man

durch Aufspeichern des Stromes in den Akkumulatoren die letzteren zur Stromabgabe in den Stunden geringen Bedarfs benutzen, während beim Wechselstrom und Drehstrom für die wenigen Lampen, die etwa in der Nacht brennen, die großen Maschinen dauernd im Betrieb sein müssen.

Trotz dieser Übelstände ist dieses Verteilungssystem, das unter anderem in Wien, in Rom, in Luzern, in Nürnberg, in Amsterdam und an vielen anderen Orten in dauerndem Betrieb ist, für große Bezirke wesentlich vorteilhafter als das Gleichstromsystem, und da die Drehstrommotoren jetzt sogar den Gleichstrommotoren den Rang abgelaufen haben, so ist das Drehstromsystem als ein mindestens gleichberechtigter, ja häufig überlegener Faktor neben die verschiedenen Gleichstromsysteme für die Verteilung elektrischer Energie getreten.

Um die Vorzüge beider Systeme zu vereinigen, geht man vielfach dazu über, ein kombiniertes Verteilungssystem einzurichten. Bei diesem wird hochgespannter Wechselstrom oder Drehstrom erzeugt und in der Stadt mittels Transformatoren in niedrig gespannten Drehstrom oder Wechselstrom verwandelt. Dieser letztere aber wird durch Wechselstrom-Gleichstromumformer (S. 456) in Gleichstrom verwandelt und der so erzeugte Gleichstrom in Verbindung mit Akkumulatoren ist nun der eigentliche dem Verbrauch überlassene Strom. Natürlich wird durch die Umformung des Wechselstroms in Gleichstrom ein nicht unerheblicher Prozentsatz der Energie verloren; trotzdem aber hat dieses System sich vielfach bewährt, weil namentlich die Beleuchtung mit Gleichstrom viel angenehmer ist als mit Wechselstrom.

Da so diese verschiedenen Systeme, jedes bei besonderen Verhältnissen, ihre besonderen Vorzüge besitzen, so macht dadurch die Verteilung elektrischer Energie unter den verschiedensten örtlichen Verhältnissen immer weitere Fortschritte. Insbesondere werden jetzt die Zentralen in größeren Städten mit Vorliebe nach dem Drehstromsystem mit Transformatoren eingerichtet.

---

10. Kapitel.

Die elektrischen Bahnen, Boote und Automobile.

Seitdem die Elektrizität einmal in die Reihe der schwere Arbeit verrichtenden Kräfte eingetreten und durch ihre leichte und rasche Fortpflanzungsfähigkeit imstande war, ihre Arbeit weit von dem Orte zu verrichten, an dem sie erzeugt wurde, seit dieser Zeit lag auch die Möglichkeit vor, die Elektrizität zur Beförderung von Eisenbahnen, Trambahnen, Wagen, Booten u. dergl. zu verwenden, und diese Einführung der Elektrizität in das Gebiet des Transportwesens hat schon jetzt bei diesem neue und bequeme Formen hervorgebracht und wird voraussichtlich noch weiter zu einer Umgestaltung und Vervollkommnung desselben führen.

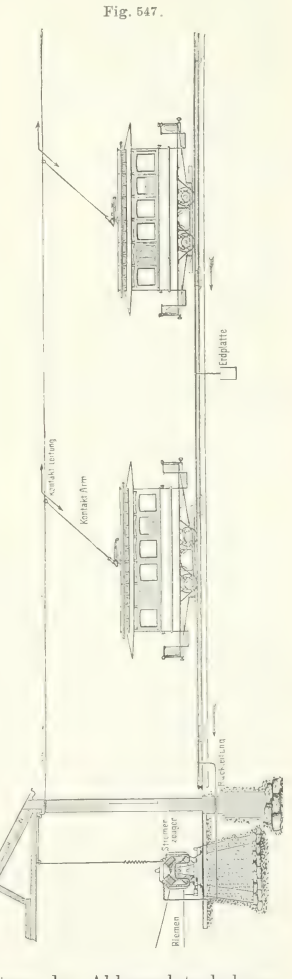
Schon im Jahre 1879 hatten Siemens & Halske die erste elektrische Eisenbahn bei der Gewerbeausstellung in Berlin hergestellt. Das Prinzip der elektrischen Eisenbahnen, deren Idee zuerst von Werner Siemens ausgesprochen und ausgeführt wurde, ist folgendes: Wenn ein elektrischer Strom von außen in eine Dynamomaschine, einen Elektromotor, eingeführt wird, so kommt der Anker derselben in Rotation. Überträgt man nun die Rotation der Achse des Ankers in irgend einer Weise auf Räder, welche auf Schienen laufen können, und führt man in den Elektromotor irgendwie einen Strom ein, so müssen sich die Räder mit dem Elektromotor und einem fest mit ihnen verbundenen Wagen auf den Schienen fortbewegen, und die elektrische Eisenbahn ist fertig.

Es ist also dieses Problem der elektrischen Eisenbahn ein spezieller Fall des Problems der elektrischen Arbeitsleistung und Kraftübertragung. Ein elektrischer Strom wird irgendwo erzeugt (sei es durch eine Dynamomaschine, die irgendwo in der Nähe der Bahn steht, sei es durch Akkumulatoren oder Batterieen), er wird in den Motor des Eisenbahnwagens eingeleitet, und dadurch kommt dieser in Bewegung. Das ist also prinzipiell nichts anderes als jede andere elektrische Kraftübertragung.

Aber bei dieser speziellen Aufgabe treten besondere Schwierigkeiten auf, deren hauptsächlichste die ist: Wie soll man dem Eisenbahnwagen (dem Motor) den elektrischen Strom zuführen? Bei einer feststehenden Kraftübertragungsanlage hat man eine bestimmte Entfernung zwischen der primären Dynamomaschine und dem Elektromotor, und man kann diese daher durch festliegende Drähte verbinden. Bei einer elektrischen Eisenbahn aber bewegt sich der Motor, und sein Abstand von der primären Dynamomaschine ist kein fester, es muß also auch die Leitung für den Strom veränderliche Länge haben. In der Tat war dies zuerst die schwierigste Frage bei dem elektrischen Eisenbahnbetrieb.

Der nächste Gedanke ist natürlich der, daß man die Schienen selbst zur Leitung des Stromes benutzt, und dies wurde auch von Siemens & Halske bei der obenerwähnten ersten elektrischen Eisenbahn getan.

Fig. 547.



Eine primäre Dynamomaschine, die fest in der Nähe der Bahn neben einer großen Dampfmaschine stand, von der sie ihre Rotation erhielt, erzeugte den Strom, der in die Schienen geleitet und von diesen dem Elektromotor, der sekundären Maschine zugeführt wurde. Es wurden damals drei Schienen verwendet. Auf den beiden äußeren bewegten sich die Räder, die mittlere diente allein für die Zuführung des Stromes. Von dieser wurde der Strom durch Rollen in den Elektromotor eingeführt und ging dann, nachdem er die Drähte des Ankers und der Elektromagnete durchlaufen hatte, durch die Wagenräder zu den äußeren Schienen und durch diese zur primären Maschine zurück.

Doch zeigte es sich bald, daß es nur in speziellen Fällen möglich ist, die Schienen zur Stromleitung zu benutzen. Bei feuchtem Wetter nämlich und auch wenn Schnee zwischen den Schienen liegt, sind die mittlere und die äußeren Schienen leitend verbunden, und es wird dadurch der Strom, der durch die Leitung geht, zu sehr geschwächt. Deshalb begann man bald nach anderen Mitteln zu suchen, um den Strom in einen Wagen sicher und ohne Verlust einzuführen.

Im Laufe der Entwickelung der elektrischen Eisenbahn wurden nun verschiedene Methoden für die Zuleitung der Elektrizität gefunden, und zwar sind es bisher drei verschiedene Systeme, durch die man elektrische Eisenbahnen betreibt, nämlich das System der oberirdischen Zuführung des Stromes, das System der unterirdischen Zuführung und endlich das System ohne Zuführung des Stromes aus der Ferne, nämlich das System der Akkumulatorbahnen.

Die oberirdische Stromzuführung wurde schon von Siemens & Halske bei einer ihrer ersten Anlagen, nachdem sich die Schienenleitung als

unzweckmäßig erwiesen hatte, eingeführt, wurde aber dann namentlich in Amerika, wo das elektrische Straßenbahnsystem zuerst die meisten Fortschritte gemacht hatte, weiter ausgebildet und ist von dort wieder nach Europa übergegangen. In der Mehrzahl aller Fälle ist es dieses System, welches bei Trambahnen und Eisenbahnen jetzt angewendet wird. Bei diesem System wird über den Schienen ein besonderer blanker Draht ausgespannt, durch welchen der Strom von der Maschine fließt. Diesen Draht, Arbeitsleiter oder Trolleydraht genannt, berührt nun ein mit dem Wagen verbundener Arm fortdauernd und leitet dadurch den Strom in den Wagen, also in den im Wagenuntergestell befindlichen Elektromotor. Von diesem aus geht der Strom dann durch die Schienen wieder zur Dynamomaschine zurück, womit der Stromkreis geschlossen ist. Laufen auf einer Bahn, wie gewöhnlich, mehrere Wagen zu gleicher Zeit, so sind diese infolgedessen alle parallel geschaltet, wie man aus Fig. 547 erkennt. Links steht die primäre Dynamomaschine; die beiden Hauptleitungen, die von dieser ausgehen, sind: oben der Arbeitsleiter, unten die Schienen, und zwischen beiden sind alle Wagenmotoren nebeneinander geschaltet.

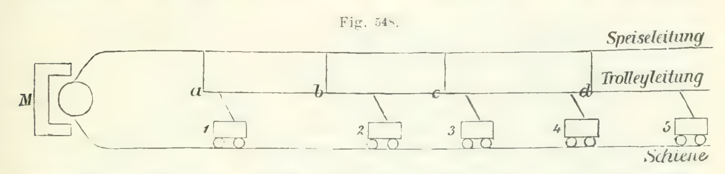
Es befindet sich also bei diesem System auf der Decke jedes Wagens ein Arm, gewöhnlich aus Stahlrohr gefertigt, welcher oben eine Kontaktrolle trägt, die längs dem Arbeitsleiter rollt und von diesem den Strom abnimmt. Der Arm ist nun mit starken Federn unten versehen, so daß die Rolle immer an den Arbeitsdraht herangedrückt wird, auch wenn dieser zwischen zwei Befestigungspunkten durchhängt, also nicht überall dieselbe Höhe über den Schienen hat, oder wenn er, wie bei Viadukten, besonders niedrig gespannt ist. Der federnde Arm muß immer die Kontaktrolle an den Leiter anpressen. Man bezeichnet dieses System des Arbeitsleiters mit einer Kontaktrolle als das Trolleysystem.

So einfach aber läßt sich das Trolleysystem nur in wenigen Fällen verwenden. Wenn durch den Arbeitsleiter fortlaufend und ununterbrochen der Strom gesendet wird, so können beim wirklichen Betrieb Schwierigkeiten entstehen. Es kann z. B. durch einen Brand notwendig sein, eine Rettungsleiter aufzustellen, den Draht durchschneiden und entfernen zu müssen, oder es kann der Draht verletzt werden und reißen. Dadurch müßte der Betrieb so lange auf der ganzen Strecke eingestellt werden, bis das Hindernis sachgemäß beseitigt ist. Um solche Störungen zu beschränken, wird der Arbeitsdraht in einzelne Strecken von 200 bis 500 m Länge, je nach der Straßenlage, geteilt, und an diesen Teilungsstellen wird in den Arbeitsleiter selbst ein isolierendes Stück eingesetzt. Die elektrische Verbindung aber zwischen den an dieser Stelle zusammentreffenden Leitungsdrähten wird dadurch hervorgebracht, daß von dem Endpunkt des einen und dem Anfangspunkt des nächsten Stückes je ein Draht zu einem Ausschalter (S. 440), der gewöhnlich in einem verschlossenen Kasten in einem nahe befindlichen Hause angebracht ist, geführt wird. Dadurch ist der elektrische Zusammenhang des ganzen Drahtes gewahrt, aber man kann nun eine solche Strecke einfach stromlos machen, indem man die Ausschalter öffnet. Aber damit ist noch nicht alles erreicht. Denn offenbar findet in solchem Falle immer noch eine vollständige Unterbrechung des Stromes, also auch des Ver-

kehrs in demjenigen Teile der Leitung statt, der hinter der ausgeschalteten Strecke liegt, von der Maschinenstation aus gerechnet. Der Strom geht eben dann von der Maschinenstation durch den Trolleydraht bis zu dem geöffneten Ausschalter und durch die auf dieser Strecke befindlichen Wagen zur Erde. Aber die hinter dem geöffneten Ausschalter befindlichen Wagen erhalten keinen Strom.

Das Interesse des Verkehrs verlangt aber, daß in solchen Fällen eben nur auf einer kleinen Strecke der Betrieb unterbrochen wird, während er sonst überall aufrecht erhalten werden soll. Diese Forderung wird nun auf folgende Weise erfüllt. Von der primären Maschine aus wird eine Hauptstromleitung (S p e i s e l e i t u n g) gelegt, welche nur dazu dient, den Strom weiter zu führen, welche aber nicht von einem

Fig. 548.

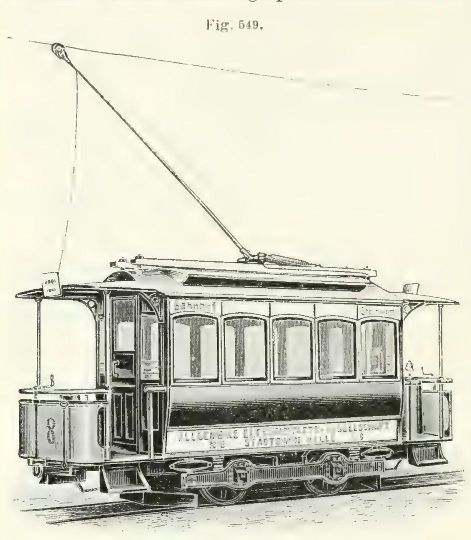


beweglichen Kontakt berührt wird. Diese Leitung kann oberirdisch oder unterirdisch, beliebig nah oder weit von den Schienen geführt werden, sie kann auch zum Teil oberirdisch, zum Teil unterirdisch gelegt sein. Dagegen wird der eigentliche Kontaktleiter (Trolleyleiter) über den Schienen geführt, und dieser wird in gewissen Abständen, alle 100 bis 200 m, durch Querdrähte mit dem Speiseleiter verbunden.

Diese Stromführung ist schematisch in Fig. 548 dargestellt. In dieser zeigt M die primäre Dynamomaschine an, deren Bürsten einerseits mit der unterirdisch oder oberirdisch gelegten Speiseleitung, andererseits mit den Schienen verbunden sind. Über den Schienen ist die Trolleyleitung ausgespannt; sie ist an verschiedenen Punkten a, b, c, d mit der Speiseleitung verbunden, aber von den Schienen ist sie isoliert. Solange kein Wagen fährt, fließt auch kein Strom durch die Trolleyleitung. Fahren nun die Wagen 1, 2, 3, 4, 5, so bildet jeder durch Vermittelung des Trolleyleiters eine Verbindung zwischen Schienen und Speiseleitung und jeder erhält, da sie alle parallel geschaltet sind, seinen Teil des ganzen Stromes. Durch diese Einrichtung ist erstens jede Störung in einem Arbeitsleiter nur auf die Strecke von 100 bis 200 m beschränkt. Wenn der Trolleyleiter an einer Stelle bricht oder entfernt werden muß, so geht der Strom trotzdem durch die Speiseleitung und wird den anderen Sektionen des Trolleyleiters zugeführt, so daß also die einzelnen Wagen doch ihren Strom bekommen. Ferner kann die Speiseleitung zum Schutz gegen alle Beschädigungen sehr hoch oder unterirdisch angebracht werden. Drittens braucht bei diesem System der Trolleyleiter nur so dick zu sein, wie er zur sicheren Führung der Rolle notwendig ist. Er braucht nicht, wenn sehr starke Ströme (bei vielen gleichzeitig fahrenden Wagen) notwendig sind, so stark zu sein, daß er diese Ströme ohne großen Verlust aufnehmen kann. Denn der Hauptstrom geht durch die Speiseleitung, und jede Sektion des Trolleyleiters wird nur von Zweigströmen durchflossen.

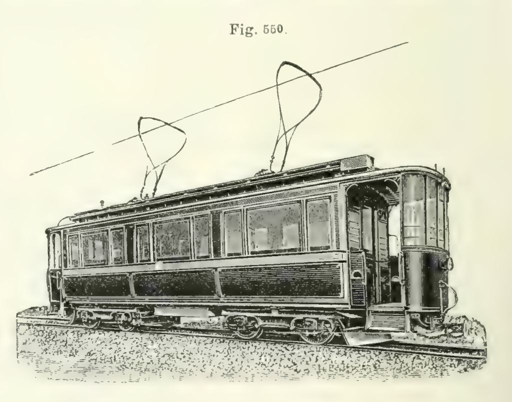
Der Trolleyleiter wird gewöhnlich an Drahtseilen aufgehängt, die entweder über die Straße gespannt werden und an den Häusern befestigt sind, oder die an besonderen Masten, welche neben den Schienen stehen, angebracht sind. Die Leitungsführung läßt sich dabei auch so einrichten, daß sie für das Auge gefällig ist. Bei Kurven und Weichen muß man natürlich sorgfältig den Trolleyleiter so spannen, daß er eine sichere Führung für die Rolle gibt, damit diese nicht herausspringt. Fig. 549 zeigt einen solchen elektrischen Trambahnwagen der Stadtbahn in Halle. Man sieht die Stange mit der Kontaktvorrichtung, welche von der Wagendecke aus sich gegen den Trolleyleiter drückt.

Fig. 549.



Die Rolle kann natürlich zuweilen von dem Trolleyleiter abspringen. Dann ist die Stromzufuhr zu dem betreffenden Wagen unterbrochen. Wenn der Wagen im Gefälle geht, so kann er dadurch, wenn man ihn nicht sofort bremst, ins Laufen kommen und Unglück anrichten. Deswegen wird in vielen Fällen statt der Gleitrolle ein Gleitbügel angewendet, bei dem ein solches Abspringen nicht vorkommen kann. Der Gleitbügel, von denen zwei an dem Wagen Fig. 550 angebracht sind, ist wie die Rolle an einem beweglichen Arm befestigt und wird von unten gegen den Trolleydraht gedrückt. Die Länge der Kontaktfläche des

Fig. 550.

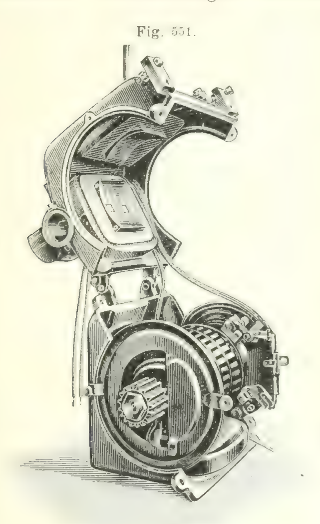


Bügels verhindert im Gegensatz zu der kleinen Kontaktfläche der Rolle das Abspringen vollständig. Außerdem brauchen die Kurven in der Trolleyleitung nicht so eng sich den Schienenkurven anzuschließen, so daß die Führung des Trolleydrahtes einfacher wird.

Da die Schienen immer die Rückleitung des Stromes zur Station übernehmen müssen, so muß man dafür sorgen, daß sie in gutem Kontakt miteinander stehen. An den Stößen werden daher zwei Schienen bei elektrischen Bahnen gewöhnlich durch angelötete Kupferbleche metallisch miteinander verbunden.

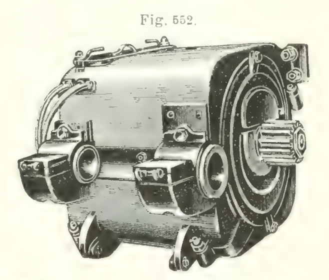
Die Spannungsdifferenz der Hin- und Rückleitung wird gewöhnlich zu 500 Volt gemacht und wird immer konstant erhalten. Da die einzelnen Trambahnwagen zwischen diesen beiden Leitungen parallel geschaltet sind, so genügt das Konstanterhalten der Spannung, um einem jeden Motor, unabhängig von den anderen, den ihm notwendigen Strom zu verschaffen.

Fig. 551.



Ein vollbesetzter Trambahnwagen braucht pro Kilometer Fahrt auf ebener Bahn ungefähr 400 Wattstunden zugeführter Energie. Der Energiebedarf, also auch der Strombedarf eines Trambahnwagens, ist aber nicht immer derselbe, sondern variiert sehr. Beim Angehen des Wagens von der Ruhe aus ist er etwa 5- bis 10mal so groß als beim Laufe auf horizontaler Strecke, bei Steigungen wird er natürlich größer, beim Herunterfahren auf geneigter Bahn geringer. Die Motoren für den Trambahnbetrieb müssen daher mit großer Zugkraft von der Ruhe aus angehen. Das leisten, wie wir S. 526 gesehen haben, am besten die Hauptstrommotoren, und deswegen werden diese fast allein bei Trambahnen angewendet. Dabei muß ein solcher Motor, da er unten am Wagengestell angebracht ist, ziemlich niedrig sein, und er muß außerdem, da er dem Straßenschmutz ausgesetzt ist, vollständig eingekapselt sein. Die Motoren werden daher für diese Zwecke so gebaut, daß das Magnetsystem einen vollständigen gußeisernen Kasten um den Anker herum bildet, der aber leicht geöffnet werden kann. Um die zu große

Fig. 552.

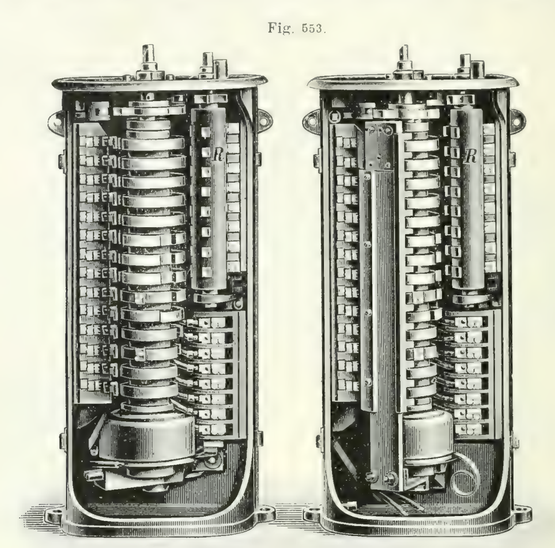


Erwärmung der Motoren durch die Einkapselung zu vermeiden, wendet man häufig die ventilierte Kapselung an, bei der durch zwei Öffnungen in der Kapselung ein Ventilator die kalte Luft von außen ansaugt und die erwärmte nach außen hinaustreibt.

In Fig. 551 und 552 ist ein solcher Straßenbahnmotor der A.E.G. mit aufgeklapptem Gehäuse und in geschlossenem Zustand dargestellt.

Die Motoren, deren Anker in Zahnräder auslaufen, treiben vermittels Zahnradübersetzung die Räder des Trambahnwagens. Die Geschwindigkeit des Motors ist gewöhnlich eine viel höhere, als die Wagenräder sie

Fig. 553.



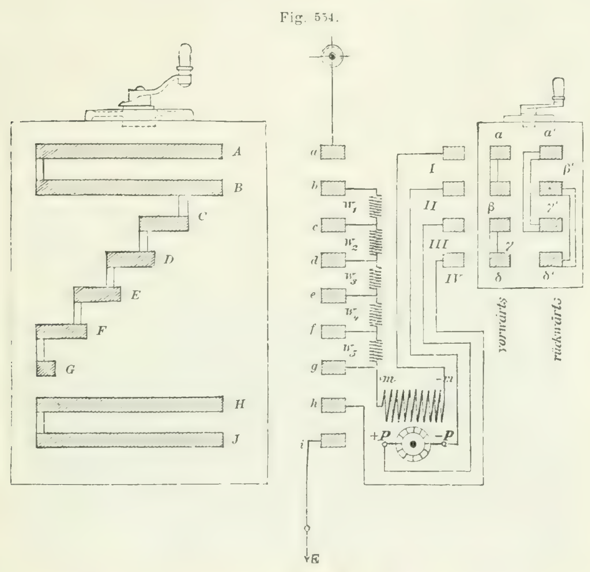
haben dürfen, und deswegen muß die Übersetzung eintreten.

Die Motoren sind an dem Untergestell der Trambahnwagen federnd befestigt und zwar ist für jede Wagenachse ein Motor vorhanden. Jeder Anker dreht zunächst ein kleines Zahnrad und dieses greift in ein größeres ein, welches nun die Wagenräder bewegt. Die Zahnräder laufen in Öl, um sich wenig abzunutzen und um das Geräusch zu vermindern. Auf dem Untergestell ist der eigentliche Waggon selbst auch wieder federnd befestigt.

Um die Geschwindigkeit des Wagens regulieren zu können und um den Wagen nach Bedarf vorwärts oder rückwärts fahren zu lassen, ist am Platze des Wagenführers ein Regulierapparat, Kontroller oder Fahrschalter genannt, angebracht. Auf einer zylindrischen Walze, die von dem Wagenführer durch eine Kurbel gedreht wird, sind überein-

ander eine Reihe von Kontaktstücken angebracht, auf welchen Federn schleifen können. Jedes Federpaar ist mit einem der Systemteile verbunden, welche nun durch den Kontroller in verschiedener Weise zusammengeschaltet werden sollen. Man sieht in Fig. 553 einen Kontroller für Straßenbahnzwecke der Siemens-Schuckertwerke, geöffnet in zwei Stellungen. Die Kontaktstücke werden mit den Ankerdrähten, mit den Drähten der Magnetbewickelungen und mit Rheostatenwiderständen verbunden. Man kann nun die Geschwindigkeit dadurch regulieren, daß Widerstände in den Stromkreis eingeschaltet werden, oder dadurch, daß die Magnetbewickelung aus mehreren Teilen besteht, die parallel oder

Fig. 554.



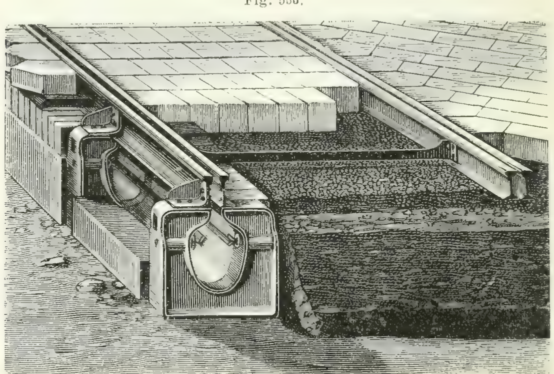
hintereinander geschaltet werden. Um den Motor rückwärts laufen zu lassen, muß man die Stromrichtung im Anker oder in den Magneten umkehren, nicht in beiden zugleich. Zu dem Zwecke ist in dem Kontroller noch eine zweite Walze, die Reversierwalze, angebracht, die nur bei Stromumkehrung benutzt wird. In Fig. 553 sieht man sie auf der rechten Seite bei R. Ein einfaches Schema der Verbindungen bei diesem Kontroller mit Umkehrwalze zeigt Fig. 554. Links ist die Walze für die Änderungen der Geschwindigkeit, rechts die für die Umkehrung. Der Strom kommt von oben in den Hebel herein nach a. Bei der ersten Stellung geht er von a nach A, B, b und dann durch alle Widerstände w_1 bis w_5, die damit vor den Motor geschaltet sind, der aus der Magnetwickelung m m und dem Anker P P besteht. Man sieht, wie durch Weiterdrehen der Kurbel links die Widerstände allmäh-

lich ausgeschaltet werden, der Wagen also immer schneller läuft. Schleift z. B. der Kontakt E auf e, so geht der Strom von a über A, B, C, D, E nach e, dann bloß über w_4, w_5 zum Motor. Wenn bei der Umkehrwalze der Hebel nach links steht, läuft der Motor vorwärts, wird er nach rechts gestellt, so ist der Strom im Anker umgekehrt und er läuft zurück. Im ersten Fall geht nämlich der Strom von g über +m, —m, I nach α, β, II, d a n n d u r c h d e n A n k e r v o n —P bis +P, nach III, γ, δ, IV, h, H, J, i zur Erde. Im zweiten Fall dagegen, wenn der Umkehrhebel rechts steht, geht der Strom von g über + m, — m, I nach α′, γ′, III, d a n n d u r c h d e n A n k e r v o n + P n a c h — P, II, β′, δ′, IV, h, H, J, i zur Erde.

Da bei der Ein- und Ausschaltung der starken Ströme an den Kontaktstücken des Kontrollers leicht Funken und Lichtbogen entstehen, so muß man dafür sorgen, daß diese Funken rasch ausgelöscht werden. Doch soll diese spezielle Einrichtung hier nicht weiter erörtert werden.

Die oberirdische Stromzuführung, wie sie bei diesen Bahnen gebraucht wird, ist zwar durch die beschriebenen Einrichtungen recht sicher ge-

Fig. 555.



macht. Aber die Drähte, die über die Straßen dabei laufen müssen, und namentlich die vielen Querdrähte, welche den Trolleydraht tragen, machen im allgemeinen keinen sehr erfreulichen Eindruck und in manchen Fällen wird, um das Straßenbild nicht zu beeinträchtigen, von den Behörden ihre Anbringung untersagt.

B e i d e r u n t e r i r d i s c h e n S t r o m z u f ü h r u n g ist nun eine solche Veränderung des Straßenanblicks ganz vermieden, allerdings auf Kosten einer erheblichen Verteuerung der Anlage. Ein solches Trambahnsystem ist von Siemens & Halske in Budapest und zum Teil in Berlin und Wien eingerichtet worden. Bei dieser Anlage befindet sich unter der einen Schiene fortlaufend ein Kanal, wie aus Fig. 555 ersichtlich ist, dessen oberen Abschluß eben die eine Schiene bildet. Dieselbe besitzt in der Mitte eine Rille von 33 mm Weite, durch welche der Kanal

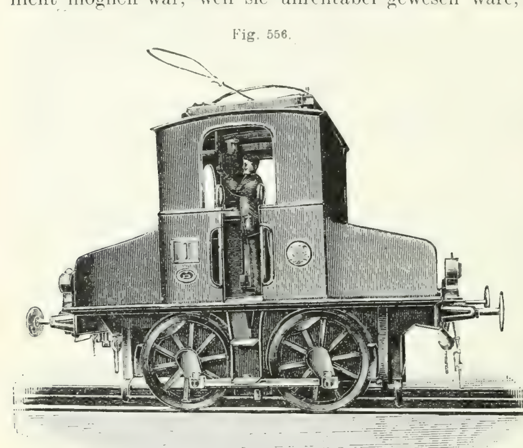
für einen von dem Wagen herabreichenden Kontaktarm zugänglich ist. In dem Kanal sind nun zwei nackte Leitungen aus dickem Winkeleisen angebracht, die also unterhalb der einen Schiene laufen. Zwischen diesen bewegt sich der Kontaktarm, bestehend aus einer gut isolierten Platte, die an ihrem unteren Ende zwei drehbare Metallzungen trägt. Diese berühren die beiden Leitungen und führen so den Strom von der einen Leitung nach oben in den Motor des Trambahnwagens und von diesem zur anderen Leitung zurück. Die beiden Leitungen haben eine Spannungsdifferenz von 300 bis 600 Volt. Es ist ersichtlich, daß dieses System von elektrischen Trambahnen sich dem Äußeren nach gar nicht von den gewöhnlichen Trambahnen unterscheidet, nur daß eben die Pferde nicht vorhanden sind. Die Anlagekosten sind dagegen natürlich viel höhere, weil der Kanal unterhalb des Straßenniveaus geführt werden muß. Besondere Vorrichtungen müssen dabei getroffen werden, um den Kanal von Wasser und Schnee und Schmutz zu befreien. Trotzdem sind die bisherigen Anlagen, die allerdings sehr rentable Linien umfassen, durchaus erfolgreiche. Für andere Fälle aber wäre dieses System wohl meistens zu kostspielig. Für deutsche Verhältnisse insbesondere, bei den häufig sehr schneereichen Wintern und regenreichen Sommern, hat sich die unterirdische Stromzuführung nicht besonders bewährt. In manchen Fällen wird das System der Oberleitung mit dem der unterirdischen Zuleitung verbunden, indem nur in den eleganten Stadtteilen unterirdische Zuführung herrscht. Dann müssen die Wagen sowohl mit Gleitbügel wie mit dem Kontaktarm für die unterirdische Leitung versehen sein und an den Übergangsstellen von dem einen zum anderen System muß die Umwechselung der Kontaktmittel stattfinden.

Auf eine dritte Weise kann man Tramways elektrisch betreiben, indem man nämlich den Elektromotor durch Akkumulatoren speist und die Akkumulatoren mit dem Wagen fahren läßt. Bei diesen Akkumulatorbahnen braucht man offenbar gar keine besondere Stromleitung. Jeder Wagen hat seine Kraftquelle bei sich, ganz wie ein bisheriger Trambahnwagen, nur daß bisher die Kraftquelle, nämlich die Pferde, vor dem Wagen, dort aber, die Akkumulatoren, in dem Wagen sich befinden. Indes hat sich dieses System für Trambahnen nicht bewährt und ist auch an denjenigen Orten, wo es eingeführt war, wieder abgeschafft worden.

Die elektrischen Trambahnen empfehlen sich vor allem durch die Tatsache, daß der Maschinenbetrieb bedeutend billiger ist als der Pferdebetrieb. Ferner dadurch, daß bei elektrisch betriebenen Bahnen auch zeitweilig weit größere Kräfte leicht zur Entwickelung kommen können als bei Pferdebahnen. Bei starken Steigungen z. B., bei denen man sonst Vorspannpferde benutzen muß, braucht der elektrische Motor nur bei stärkerem Strom, d. h. ohne eingeschaltete Widerstände zu laufen, um diese Kraft zu entwickeln. Die elektrischen Wagen können auch, wo es erlaubt ist, weit schneller fahren als die von Pferden gezogenen. Ferner kann ein elektrischer Wagen wegen des Fortfalls der Pferde größer gemacht werden als ein anderer Wagen, ohne die Straßen mehr zu sperren, und endlich kann man bei elektrischem Betrieb, wenn Andrang vorhanden ist, dem elektrischen (Motor-) Wagen andere Wagen

anhängen oder man kann auch leicht viel mehr Wagen laufen lassen als bei normalem Betrieb, falls nur die primäre Dynamomaschine von vornherein groß genug gewählt ist. Dies sind Vorzüge, welche der weiteren Einführung des elektrischen Trambahnbetriebes zu Hilfe kommen. In der Tat hat sich auch überall, wo elektrische Trambahnen eingeführt sind, eine ganz außerordentliche Zunahme des Verkehrs gezeigt und, was für die Direktionen die Hauptsache ist, neben der beträchtlichen Erhöhung der Einnahmen pro Wagenkilometer ergab sich ausnahmslos eine beträchtliche Verminderung der Ausgaben. In manchen Orten, in denen wegen der schwierigen Terrainverhältnisse eine Pferdebahn überhaupt nicht möglich war, weil sie unrentabel gewesen wäre, ist man sogar direkt zum elektrischen Trambahnbetrieb, ohne den sonstigen Umweg, gekommen, ebenso wie ja auch in vielen kleineren Orten sich die elektrische Straßenbeleuchtung zweckmäßig einführen ließ, ohne daß diese vorher Gasbeleuchtung gehabt hätten.

Fig. 556.

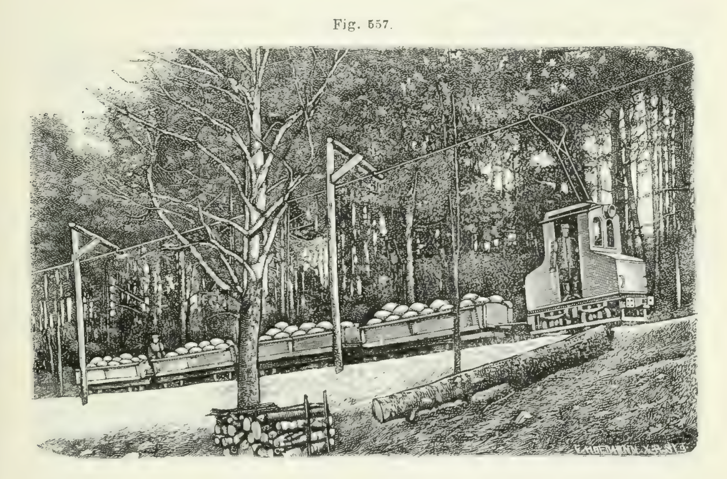


Der elektrische Betrieb beginnt nun auch vielfach für kleine Nebenbahnen, für landwirtschaftliche Bahnen und insbesondere für Bahnen in Bergwerken sich einzuführen. Die Führung der elektrischen Oberleitung erhöht zwar die Kosten der Geleiseanlage gegenüber den gewöhnlichen Bahnen. Aber man braucht zur Erzeugung der Kraft nur eine einzige große Dampfmaschine stationär aufzustellen, welche viel weniger Kohlen pro Pferdekraft verbraucht als eine Lokomotive, und man erspart die sehr teuren Dampflokomotiven, indem man die viel billigeren elektrischen Lokomotiven benutzt. Außerdem kann das Geleise einfacher gebaut werden, weil die schweren Lokomotiven fortfallen. Solche elektrische Lokomotiven werden in verschiedenen Formen gebaut. Sie eignen sich wegen ihrer dauernden Betriebsbereitschaft für manche Zwecke, z. B. für Beförderung von Gütern auf Anschlußgeleisen von den Fabriken nach den Stationen und umgekehrt, ferner auch im Eisenbahndienst selbst für das Rangieren von Zügen. Die Lokomotiven werden zuweilen als Akkumulatorlokomotiven eingerichtet, meistens aber auch für Oberleitungsbetrieb. Fig. 556 zeigt eine solche Lokomotive der Allgemeinen Elektrizitäts-Gesellschaft für den Rangierdienst in Gleiwitz.

Die Lokomotive enthält nur den Elektromotor mit dem Kontroller und den nötigen Schalthebeln und Sicherungen. Für Grubenbahnen werden diese Lokomotiven natürlich viel niedriger eingerichtet. Bei landwirtschaftlichen Betrieben werden zur Beförderung der Produkte nach der Bahnstation schon jetzt vielfach kleine elektrische Feldbahnen benützt, namentlich wenn die betreffenden Güter an eine Überlandzentrale (Kap. 8) angeschlossen sind. Der Geleisebau kann bei solchen kleinen Bahnen verhältnismäßig roh ausgeführt werden und auch für die Aufhängung des Fahrdrahtes sind keine besonderen Einrichtungen erforderlich. Fig. 557 zeigt eine solche kleine landwirtschaftliche Bahn auf geneigtem Terrain.

Für schwächeren Eisenbahnverkehr, wie er auf vielen Lokallinien vorhanden ist, sind die Dampflokomotiven wegen ihrer längeren Anheiz-

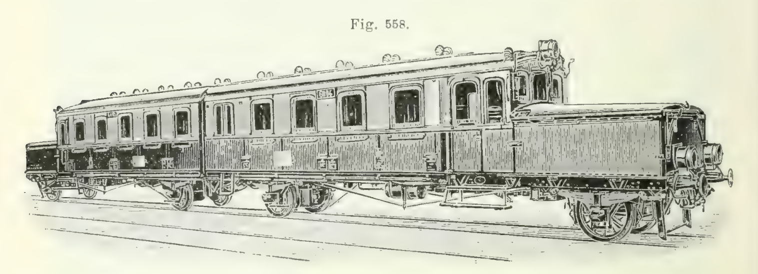
Fig. 557.



zeit und ihrer komplizierten Bedienung, die sehr geschulte Kräfte erfordert, wirtschaftlich nicht rentabel. Die preußischen Eisenbahnen haben, nach vielfachen Versuchen, für diese Zwecke einfache Züge eingerichtet, die aus je zwei Wagen bestehen und die mit Akkumulatoren betrieben werden. Fig. 558 zeigt einen derartigen preußischen Akkumulator-Doppelwagen. Zwei eng gekuppelte Personenwagen haben an je einem Ende einen niedrigen Anbau, in welchem sich die Akkumulatoren befinden, und zwar in 12 Kästen à 14 Zellen, so daß eine Spannung von zirka 340 Volt vorhanden ist. Die Akkumulatoren liefern den Strom für zwei Hauptstrommaschinen, welche die beiden mittleren Achsen des Doppelwagens antreiben. An jeder Seite des Doppelwagens, anschließend an den Batterieraum, befindet sich ein Führerstand, der mit einem Kontroller, wie bei den Trambahnwagen, und mit den nötigen Meßapparaten, Bremsen, Sicherungen, Umschaltern ausgestattet ist.

Ebenso wie im Stadtverkehr und für Kleinbahnen bieten aber die elektrischen Bahnen auch für den Fernverkehr gewisse Vorteile. Für große Entfernungen eignet sich aber nur der hochgespannte Wechselstrom und Drehstrom. Der Drehstrom hat aber eine große Reihe von Nachteilen. Er braucht drei Leitungen, was für Fernleitungen eine nicht unbedeutende Erhöhung der Anlagekosten bedeutet. Außerdem machen die drei Leitungen in Bahnhöfen, bei Schienenkreuzungen und Weichen die Anlage unübersichtlich. Ferner hat der Drehstrommotor immer eine ganz bestimmte Geschwindigkeit, die sich nicht leicht regulieren läßt, so daß Verspätungen der Züge nicht eingeholt werden können. Alle Wünsche, die der Fernverkehr auf großen Bahnen zu stellen hat, können bei dem heutigen Stand der Technik nur durch den einphasigen Wechselstrom erfüllt werden, dieser ist die einzige Stromart, die für große Bahnen in Betracht kommt. Aber gerade bei dem einphasigen Wechselstrom ist die Frage wegen der geeigneten und brauchbaren Motoren die schwierigste. Die Motoren müssen beim Eisenbahnbetrieb natürlich mit voller Last angehen können und müssen in ihrer Tourenzahl und ihrer Drehungsrichtung

Fig. 558.



einfach reguliert werden können. Deswegen sind die Induktionsmotoren für einphasigen Wechselstrom durchaus unbrauchbar für den Eisenbahnverkehr. Der einphasige Kollektormotor dagegen (S. 533 f.) scheint derjenige Motor zu sein, welcher allen Anforderungen genügt. In der Tat werden bereits eine große Anzahl Bahnen mit reinem Wechselstrom und solchen Einphasenmotoren betrieben, so die Stubaitalbahn bei Innsbruck, Strecken bei Berlin, Hamburg, in der Schweiz, Italien, England u. s. w., und es ist möglich, daß der einphasige Wechselstrom von hoher Spannung berufen sein wird, die Dampfeisenbahnen allmählich zu depossedieren. Während man bei der Stubaitalbahn sich noch mit einer Spannung von 2500 Volt begnügte, werden Strecken auf den preußischen Staatsbahnen schon mit 6000 Volt betrieben und in anderen Fällen ist man schon weit darüber hinausgegangen. Wegen der Wirtschaftlichkeit der Kollektormotoren nimmt man dabei die Periodenzahl des Wechselstroms so klein wie möglich. Statt der für Beleuchtung üblichen 50 Perioden wendet man solche von 25 oder gar bloß 15 für den Bahnbetrieb an.

Die Umwandlung der großen Bahnen aus dem Dampfbetrieb in elektrischen Betrieb macht bisher überall nur sehr langsame Fortschritte. Abgesehen davon, daß die Technik des einphasigen Wechselstroms, welcher

dafür, wie gesagt, allein in Frage kommt, erst seit einigen Jahren zu genügenden Resultaten geführt hat und abgesehen von anderen finanziellen Erwägungen, welche hierbei natürlich eine sehr gewichtige Rolle spielen, kommen insbesondere auch militärische Rücksichten in Betracht, welche einer solchen Umwandlung nicht sehr günstig sind. Es ist nämlich zu beachten, daß eine elektrische Bahn im Kriegsfalle viel leichter zu beschädigen und unverwendbar zu machen ist, als eine Dampfbahn. Durch das Zerschneiden der Stromzuführungsdrähte ist der elektrische Betrieb sofort auf weite Strecken lahm zu legen, während bei den Dampfbahnen das Aufreißen der Schienen doch nur lokale Störungen auf mehr oder minder große Strecken hervorbringt. Diesem Gesichtspunkt läßt sich eine erhebliche Bedeutung nicht absprechen. Jedenfalls scheint die Hoffnung, daß das ganze Bahnsystem elektrisiert werden würde, noch auf lange hinaus illusorisch. Dagegen fallen natürlich bei einzelnen wichtigen Bahnen, wie z. B. bei der Berliner Stadt- und Ringbahn, diese Bedenken fort und mit ihrer Umwandlung in elektrischen Betrieb scheint wohl in nicht allzulanger Zeit gerechnet werden zu dürfen.

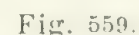
Bei derartigen elektrischen Vollbahnen, wie sie jetzt zum Teil ausgeführt, zum Teil geplant sind, ist ein wesentlicher Unterschied im Betrieb gegenüber den Dampfbahnen nicht vorhanden. Lange Züge mit elektrischen Lokomotiven ersetzen die langen Züge mit Dampflokomotiven.

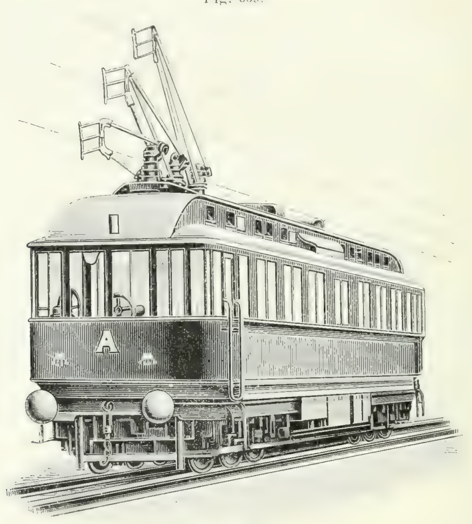
Aber die Elektrizität erlaubt auch einen ganz anderen Betrieb von großen Fernbahnen. Da nämlich bei elektrischen Bahnen jeder einzelne Wagen einen Motor besitzen kann, so eignen sie sich ganz besonders zum Einzelbetrieb. Rasch aufeinander folgende einzelne Wagen, jeder mit einer beschränkten Zahl von Personen, wie sie gerade bei Straßenbahnen eingeführt sind, und die mit großer Geschwindigkeit laufen, werden allmählich auch für größere Entfernungen eingeführt werden. Vor einigen Jahren hat sich in Berlin eine Gesellschaft für elektrische Schnellbahnen gebildet, welche sich die Aufgabe gestellt hat, die Einrichtungen eines solchen Fernverkehrs praktisch durchzuarbeiten und welche sich das Ziel steckte, elektrische Bahnen zu bauen, welche mit 200 Kilometer pro Stunde Geschwindigkeit befahren werden. Dieses Ziel hat sie im Jahre 1903 in glänzender Weise erreicht. Sie hatte zwei Schnellbahnwagen, von denen der eine von Siemens & Halske, der andere von der Allgemeinen Elektrizitäts-Gesellschaft gebaut war, und beide lösten tadellos die Aufgabe, mit einer Geschwindigkeit von über 200 Kilometern pro Stunde zu fahren.

Der Strom wurde bei diesen Fahrten, welche zwischen Zossen und Lichterfelde stattfanden, auf drei Fahrdrähten dem Wagen zugeführt und zwar war es Drehstrom mit 10 000 bis 15 000 Volt Spannung. Fig. 559 zeigt den Schnellbahnwagen der Allgemeinen Elektrizitäts-Gesellschaft. Durch je drei kurze Kontaktstücke wurde der Strom von den Fahrdrähten abgenommen und in das Innere des Wagens geleitet. Die Stromabnehmer mußten natürlich besonders konstruiert sein, um trotz der großen Geschwindigkeit immer sicheren Kontakt zu machen. Die Kontaktarme nehmen, wie man sieht, den Strom nicht von oben, sondern von der Seite ab. Der hochgespannte Strom wird im Innern des Wagens durch zwei parallel geschaltete Transformatoren in niedrig gespannten verwandelt und dieser geht in die Drehstrommotoren ein, natürlich durch

Anlasser, Schaltapparate und Sicherungen hindurch. Jeder von den beiden Motoren konnte zwischen 250 und 750 Pferdekräfte leisten. Die besonderen Einrichtungen, wie die Motoren an dem Wagengestelle befestigt und wie sie mit den Rädern des Wagens verbunden waren, ferner die Schaltungen, Meßapparate u. s. w. können hier nicht eingehend behandelt werden.

Durch das Gelingen dieser kühnen und großartigen Versuche haben die beiden Gesellschaften, Siemens & Halske und Allgemeine Elektrizitäts-Gesellschaft der Elektrotechnik ganz neue und weitreichende


Fig. 559.



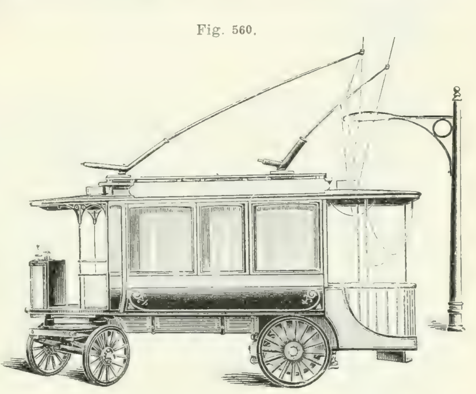
Aussichten eröffnet. So wie die großen Kraftübertragungsversuche bei der Frankfurter Ausstellung (S. 533 f.) die Möglichkeit der Kraftübertragung auf große Entfernungen zuerst gezeigt haben und damit unzählige Anwendungen, die im Laufe der Jahre sich ergaben, vorbereitet haben, so werden auch diese Schnellbahnversuche vermutlich eine Umwälzung unseres ganzen Fernverkehrs allmählich hervorbringen. Wo die pekuniären Mittel zur Einrichtung eines solchen Schnellverkehrs vorhanden sind, da kann die Elektrotechnik jetzt mit Sicherheit die Ausführung übernehmen. Die Unternehmungslust des Kapitals wird hoffentlich auch hier die bureaukratische Ängstlichkeit besiegen, und dadurch dem menschlichen Verkehr einen neuen großartigen Aufschwung geben.

Die Elektrizität unterscheidet sich eben in ihren Wirkungen von der Dampfkraft so wesentlich, daß auch der Transport von Massen auf elektrischem Wege anders eingerichtet werden kann als der mit Dampfkraft. Die Dampfeisenbahn benutzt vorteilhaft eine sehr starke Loko-

motive, an welche eine sehr große Last in vielen Waggons angehängt wird. Wollte man jeden einzelnen Waggon mit einer kleinen Lokomotive versehen, so würde das ein sehr unpraktisches Beginnen sein. Die Elektrizität dagegen läßt sich ohne erhebliche Verluste in eine ganze Anzahl kleiner Maschinen einleiten, die dann jede nur eine kleine Arbeit leisten können. Wenn also beim Dampf die Zentralisierung notwendig ist, so ist bei der Elektrizität die Teilung vorteilhaft, die Zentralisierung aber auch nicht unvorteilhaft. Daher eignet sich die Elektrizität besser als der Dampf zum Betrieb von Trambahnen, für Bahnen in Bergwerken, für landwirtschaftliche Bahnen und wohl ebenso gut wie der Dampf zum Betrieb von großen Vollbahnen.

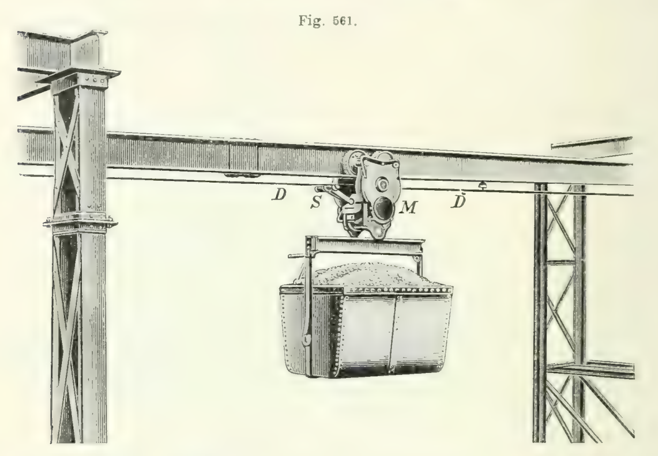
In manchen Fällen läßt sich dabei der elektrische Betrieb mit Zufuhr der Elektrizität auch da einrichten, wo kein Schienengeleise gelegt werden kann oder darf oder wo die Ausführung des Geleises zu kostspielig wäre. Man hat begonnen, sogenannte geleislose elektrische Bahnen auf Landstraßen für den Personen- und namentlich Gütertransport einzurichten. Man spannt zwei Fahrdrähte seitlich oder mitten auf der Straße, der Länge nach, wie beim Trambahnbetrieb. Der Wagen, etwa ein Omnibus oder ein lokomotivartiger Karren, nimmt auch durch Gleitrollen oder Gleitbügel von den Fahrdrähten den Strom ab und führt ihn in seinen Motor. Aber die Gleitstangen sind so nach allen Richtungen drehbar und zum Verlängern eingerichtet, daß der Wagen nicht direkt unter den Fahrdrähten zu bleiben braucht, sondern nach jeder Seite um 3,5 Meter sich herausbewegen kann. Dadurch ist ein Ausweichen des Wagens auf der Landstraße möglich, während doch immer durch die Fahrdrähte ihm Strom zugeführt wird. Fig. 560 zeigt einen solchen elektrischen Omnibus der Firma Max Schiemann & Co. in Dresden, welche sich hauptsächlich mit der Einführung dieses Systems beschäftigt. Der Wagen ist gerade im Umwenden begriffen. Er besitzt zwei Achsen, von denen die hintere fest ist, während die vordere vom Führerstand aus gedreht werden kann, um leichte Lenkbarkeit des Wagens zu erzielen. Die Elektromotoren, von denen gewöhnlich zwei angebracht werden, wirken auf die Hinterräder. Es müssen hier zwei Fahrdrähte zur Hin- und Rückleitung des Stromes angebracht sein, weil eben keine Schienenrückleitung besteht. Auf dem Dach des Wagens sind zwei steife Stangen von 5 bis 5,5 m Länge angebracht, welche nach allen Richtungen hin drehbar sind. An ihrem

Fig. 560.



Ende tragen sie Kontaktstücke, Schleifschuhe, welche durch die Stangen von unten an die Fahrdrähte angedrückt werden und stets sicher Kontakt bewirken. Durch die große Länge der Kontaktstangen kann der Wagen auf der Landstraße ausweichen. Es können auch mehrere Wagen an denselben Fahrdrähten in gleicher oder entgegengesetzter Richtung laufen, wobei bei der Begegnung ein Wagen ausweicht, für kurze Zeit seine Stange herunterzieht, bis der andere Wagen vorbei ist, und dann weiterfährt. Für die Beförderung von Personen und Gütern zwischen Orten, an denen kein sehr dichter Verkehr ist, so daß eine Anlage von Schienen sich nicht lohnt, ersetzt eine solche Bahn in billiger und rentabler Weise

Fig. 561.



den Pferdebetrieb. Die Hauptschwierigkeit besteht in der Verfassung der Straßen, welche durch den Wagen selbst allmählich noch verschlechtert wird.

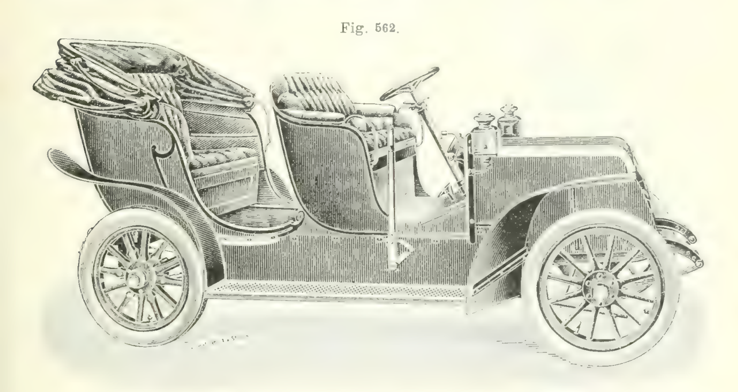
In Bremen sind kürzlich einige Omnibuslinien im Anschluß an die Trambahnlinien in ähnlicher Anordnung ausgeführt worden.

Der Transport von Waren auf längere oder kürzere Strecken innerhalb von Fabriken oder von und zu Bahnhöfen oder Schiffen wird auch vielfach auf elektrischem Wege durch die Bleichertschen Elektrohängebahnen besorgt. Dabei sind die Materialwagen mit einem gekapselten Elektromotor (Fig. 561 bei M) verbunden, der auf passend durch die Luft geführten Schienen läuft und durch Stromabnehmer S von dem Leitungsdraht DD seinen Strom erhält. Selbsttätige Einrichtungen zum Stillstellen der Wagen an den richtigen Orten, zum Verhüten des Zusammenfahrens, zur Überwindung größerer Höhenunterschiede u. dergl. machen das System für alle praktisch vorkommenden Fälle geeignet.

Die Ersetzung des Pferdebetriebs durch Maschinenbetrieb hat in den letzten Jahren auch in dem gewöhnlichen Fuhrwesen enorme Fortschritte gemacht, indem man Droschken, Equipagen, Omnibusse, Gepäckwagen u. s. w. als Automobile eingerichtet hat. Die meisten dieser

Automobile werden so betrieben, daß sie einen Benzinmotor mit sich führen. Sie haben daher die bekannten Nachteile, daß sie nicht ungefährlich sind, daß sie infolge der hin und her gehenden Bewegung des Motorkolbens und des verpuffenden Dampfes Lärm machen, der namentlich für die Fahrenden selbst auf die Dauer lästig ist, und daß sie, was namentlich die Nebenmenschen merken, unangenehm riechenden und schmutzenden Dampf verbreiten. Auch hier hat nun die Elektrotechnik eingegriffen. Von allen den erwähnten Nachteilen sind elektrische Automobile, die man in Frankreich und auch bei uns jetzt zweckmäßig als Elektromobile bezeichnet, frei, da ein Elektromotor von selbst eine rotierende Bewegung hat und nicht erst eine hin und her gehende in eine rotierende umzusetzen braucht, und da bei einem Elektromotor von Geruch, von Schmutz und von Gefahr keine Rede ist.

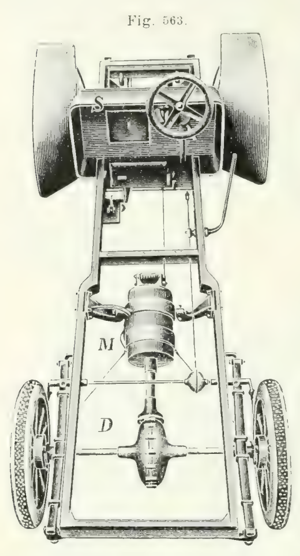
Fig. 562.



Um ein Automobil elektrisch zu betreiben, müssen die Räder des Wagens durch einen Elektromotor in Bewegung gesetzt werden, und der Motor muß seinen Strom von einer Akkumulatorenbatterie erhalten. Erst seitdem die Akkumulatorenfabriken besonders leichte und haltbare Akkumulatoren für Automobile herzustellen gelernt haben, können die Elektromobile mit den Benzinautomobilen in Wettbewerb für den Stadtverkehr treten. Eine Ausführung eines solchen Wagens als Viktoriawagen der Siemens-Schuckertwerke zeigt Fig. 562. Die Akkumulatorenbatterie, welche aus 44 Zellen besteht, also 88 Volt Spannung liefert, ist bei diesen Wagen vorn vor dem Führersitz unter einer Haube angebracht, so daß die Wagen sich in der Form von den gewöhnlichen Automobilen nicht unterscheiden. Das Untergestell des Wagens (Fig. 563) zeigt, daß der Motor M in der Mitte des Wagens in einem Ringe aufgehängt ist und durch eine Welle das Differentialgetriebe D bewegt, welches die Hinterräder antreibt. Pro Wagenkilometer braucht das Elektromobil 125 bis 130 Wattstunden. Die Akkumulatorenbatterie hat eine Kapazität von 145 Amperestunden, so daß mit einer Ladung etwa 100 km gefahren werden können, was bei einer Geschwindigkeit von 20 bis 25 km im Stadtverkehr ergibt,

daß eine Ladung für 4 bis 5 Stunden ununterbrochene Fahrt ausreicht. Vorn beim Wagenführer ist erstens eine kräftige, durch den Fuß zu betreibende Bremse und außerdem ein Steuer zur Lenkung des Wagens und ein Regulator zum Anfahren, zur Änderung der Geschwindigkeit und zum elektrischen Bremsen, was durch Widerstände bewirkt wird. Diese Regulatoren werden auch hier Kontroller genannt und ganz ähnlich eingerichtet, wie beim Trambahnbetrieb (s. o. S. 580). Bei dem gezeichneten Automobil ist der Kontroller in die Spritzwand S eingebaut.

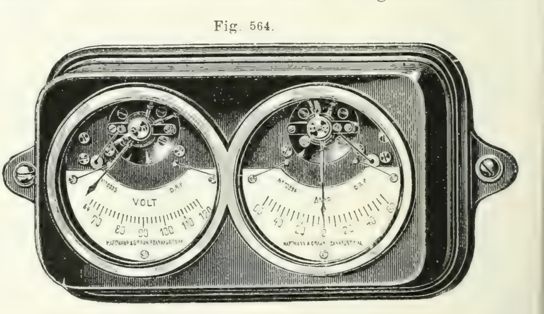
Fig. 563.



Als äußeres Kennzeichen, daß ein Automobil elektrisch betrieben wird, dient immer ein Volt- und Amperemeter, welches vorn beim Führer angebracht wird und diesen über Strom und Spannung seines Motors auf dem laufenden hält, welches aber insbesondere auch beim Laden der Batterie notwendig ist. Fig. 564 zeigt ein solches kombiniertes Instrument von Hartmann & Braun. Natürlich werden bei einem solchen Wagen alle Errungenschaften der modernen Automobiltechnik benutzt, um ihn möglichst leicht und leichtgehend zu machen. In derselben Weise kann man auch größere Wagen, Omnibusse, Paketwagen etc. einrichten, wobei dann die Akkumulatorenbatterie entsprechend größer genommen werden kann.

Die Edisonakkumulatoren werden von den Bergmann-Elektrizitätswerken A.G. in Berlin zum Betrieb ihrer Fulgura-Elektromobile angewendet. Fig. 565 zeigt ein Chassis eines solchen Luxusautomobils mit einer Edisonbatterie.

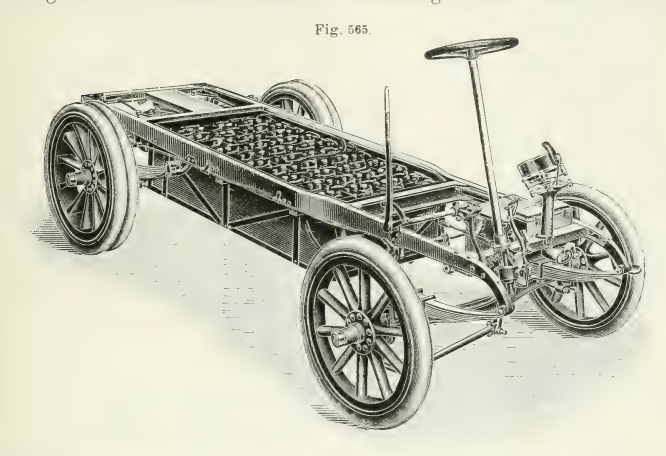
Fig. 564.



Elektrische Automobile eignen sich naturgemäß bisher nur als Stadtautomobile innerhalb derjenigen Orte, in denen elektrische Zentralen vorhanden sind. In manchen Städten gehen die Behörden damit um, nur elektrisch betriebene Automobildroschken zuzulassen, um den Lärm und üblen

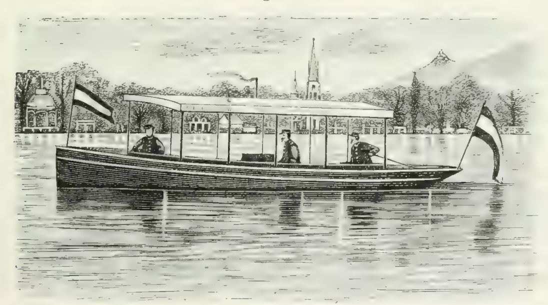
Geruch, der mit dem sonst so vortrefflichen Fahrzeug verbunden ist, einzuschränken. Zu größeren Ausflügen lassen sich bisher die elektrischen Automobile nicht benützen, weil sie nicht für sehr lange Zeit Energie mit sich nehmen können. Doch hängt dieser Nachteil nur von

Fig. 565.



der noch geringen Verbreitung der elektrischen Zentralen ab. Könnte man darauf rechnen, in jedem Dorf elektrischen Strom (und zwar Gleichstrom zum Laden der Akkumulatoren oder Wechselstrom mit Umformern) zu finden, wie es in einigen Teilen der Schweiz bereits der Fall

Fig. 566.

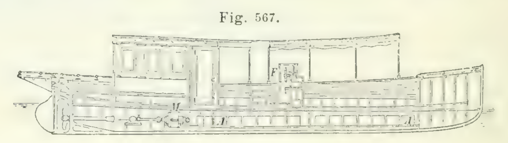


ist, so könnte man mit Elektromobilen auch große Touren unternehmen, und es ist zu hoffen, daß es dazu noch einmal kommen wird.

Für die Schiffahrt im großen ist der elektrische Betrieb natürlich nicht brauchbar. Große Schiffe haben ihre Dampfmaschinen und brauchen die Umsetzung der Dampfkraft in Elektrizität nicht. Dagegen

lassen sich kleine Vergnügungsboote, in welche man keine Dampfmaschinen bringen will, elektrisch betreiben, und zwar auch mittels Akkumulatoren, die an der Landungsstelle von einer Dynamomaschine geladen werden. Derartige Boote sind in den letzten Jahren vielfach gebaut worden. Aber auch als Fährboote und als Revisionsboote für Zollbehörden und allgemein als Dienstboote für Behörden werden sie jetzt vielfach benutzt. Fig. 566 gibt eine Ansicht eines kleinen Vergnügungsbootes, welches Akkumulatoren der Hagener Fabrik besitzt. Dasselbe enthält 40 Akkumulatoren mit einer Leistung von 220 Amperestunden und einen dreipferdigen Motor. Das Gewicht der elektrischen Ausrüstung beträgt 1950 kg. Die allgemeine Anordnung der elektrischen Einrichtung solcher Boote ist aus Fig. 567 zu ersehen. Man sieht am Boden des Bootes die Akkumulatorenkästen A A, welche den Motor M antreiben. Dessen Achse ist direkt mit der Schiffsschraube verbunden. Am Führerstand F ist ein Kontroller angebracht, mit welchem der Steuermann durch Drehen einer Kurbel Widerstände ein- oder ausschalten und so die Geschwindigkeit des Schiffes verändern kann. Bei einer Geschwindigkeit von 10 Kilometer pro Stunde

Fig. 567.



kann das oben dargestellte kleine Boot mit *einer* Ladung 20 Stunden fahren, also 200 Kilometer zurücklegen.

In letzter Zeit hat man begonnen, die Elektrizität für die *Schleppschiffahrt* geeignet zu machen, was um so wichtiger ist, da die Anlegung großer Kanäle, wie sie jetzt in Aussicht stehen, erfordert, daß auf diesen der Transport mit möglichst vollkommenen Mitteln geschehe. Von den verschiedenen Systemen, die sich dem elektrischen Betrieb hierbei bieten, ist vollständig durchgearbeitet und am Finowkanal erprobt dasjenige von Siemens & Halske. Bei diesem läuft neben dem Kanal, auf dem sogenannten Treidelweg, eine elektrische kleine Lokomotive auf einer Schiene und zieht durch das Treidelseil die Schiffe, ganz so, wie es bisher durch Pferdekraft oder Menschenkraft geschah. Es ist anzunehmen, daß dieses System der *elektrischen Treidelei* sich in vieler Beziehung als vorteilhaft erweisen wird.

Für den Betrieb von lenkbaren Luftballons oder von Aeroplanen hat man bisher die Elektrizität noch nicht in Anspruch genommen. Der Elektromotor zwar eignet sich vortrefflich zum Antrieb der Luftschrauben (Propeller), die ein solcher Ballon oder ein Aeroplan besitzt. Er hat ein verhältnismäßig kleines Gewicht für die Kraft, die er leisten kann. Aber zum Betätigen des Elektromotors muß man die Elektrizität in Akkumulatoren aufgespeichert mitführen und diese sind, wie es scheint, vorläufig noch ein zu schwerer Ballast. Doch kann man wohl auch hierbei nicht voraussagen, welche Entwicklung dieser neueste Zweig menschlichen Könnens nehmen wird.

---

11. Kapitel.

Die Elektrochemie.

Schon vor fast vierzig Jahren sprach Werner Siemens, der Schöpfer der modernen Elektrotechnik, aus, daß in dem Bereich der chemischen Prozesse dem elektrischen Strom noch die größte Zukunft bevorzustehen scheine. „Gerade auf diesem Gebiete," sagt Siemens, „wird der elektrische Strom voraussichtlich künftig die größten Erfolge aufzuweisen haben und auf ihm der Menschheit die größten Dienste leisten können. Technisch noch ganz unbebaut liegt das weite, so viel versprechende Gebiet der Elektrolyse feuerflüssiger Leiter da, und weder die wissenschaftliche noch die technische Chemie hat die analytische und synthetische Kraft des Stromes bisher gebührend gewürdigt."

Es hat fast dreißig Jahre gedauert, bis diese Voraussage sich zu erfüllen begann, aber dafür wird seit dieser Zeit mit um so größerem Eifer die Ausbildung gerade dieser neuen Technik, der Elektrochemie, von vielen Seiten in Angriff genommen, und diese Bestrebungen haben schon sehr wertvolle Früchte getragen und versprechen noch viele neue ungeahnte Errungenschaften.

Unter der Elektrochemie verstehen wir hier ganz allgemein die Darstellung chemischer Stoffe auf elektrischem Wege. Wir verstehen nicht darunter die Galvanoplastik, obwohl diese sich auch der Elektrolyse bedient, da es der Elektrochemie wesentlich auf die Stoffe ankommt, die sie bereitet, der Galvanoplastik aber auf die Form, in welcher sie die erzeugten Stoffe benutzt.

Die Aufgaben, die die Elektrochemie bisher im wesentlichen hat lösen können, sind folgende: Erstens die Gewinnung reiner Metalle aus hüttenmännisch gewonnenen zusammengesetzten Produkten oder aus sonstigen natürlich vorkommenden oder künstlich hergestellten Verbindungen derselben. Man bezeichnet diesen Teil der Elektrochemie zweckmäßig als elektrische Metallurgie.

Eine zweite Aufgabe besteht in der Herstellung wertvollerer chemischer Verbindungen aus minder wertvollen durch Vermittelung des elektrischen Stromes. Diese Aufgabe ist bisher im wesentlichen gelöst bei der Erzeugung von Soda, von Chlor und von Ätzkali und Ätznatron durch Hilfe der Elektrolyse und bei der Erzeugung von Calciumkarbid und von Stickstoffverbindungen aus der Luft mit Hilfe des elektrischen Lichtbogens.

Die *dritte* Aufgabe besteht in der Herstellung gewisser chemischer Stoffe, welche sofort bei ihrem Entstehen durch Oxydation oder Reduktion von schon vorhandenen Substanzen wertvolle Dienste leisten. Zu dieser Abteilung gehört die elektrische Darstellung des Ozons, ferner die Herstellung von Bleichflüssigkeiten und die Methoden zur Reinigung der Ablaufwässer.

Das hauptsächlichste Mittel, dessen sich die Elektrochemie bedient, ist die *Elektrolyse*, die Eigenschaft des galvanischen Stromes, daß er zusammengesetzte Flüssigkeiten in ihre Bestandteile zerlegt. Aber die Elektrolyse ist nicht das einzige Hilfsmittel der Elektrochemie, vielmehr macht sie sich auch jede andere brauchbare Eigenschaft des elektrischen Stromes dienstbar. Dazu gehören hauptsächlich die Wärmewirkungen des elektrischen Stromes und insbesondere die außerordentlich hohen Temperaturen, welche man durch den elektrischen Lichtbogen erzeugen kann, bei denen *alle* Substanzen, selbst die am schwersten schmelzbaren (außer der Kohle), mit Leichtigkeit flüssig werden. Eine weitere Eigenschaft der Elektrizität, welche bei der Darstellung des Ozons angewendet wird, ist die Entladung hochgespannter Elektrizität durch Gase, welche mit einer Veränderung dieser Gase verbunden ist, die vielleicht auch elektrolytischer Natur ist.

Es ist selbstverständlich, daß die Technik auch, wo es für sie von Vorteil ist, rein chemische Prozesse zur Unterstützung der elektrolytischen Prozesse mit zu Hilfe nimmt und gerade in der Vielseitigkeit, welche die Kombination von elektrolytischer und rein chemischer Umsetzung bietet, liegt die Aussicht auf eine großartige Weiterentwicklung dieser neuen Technik.

Die *Elektrolyse*, das wichtigste Hilfsmittel der Elektrochemie, besteht, wie im ersten Teil Kap. 6 ausführlich auseinandergesetzt ist, darin, daß der elektrische Strom, wenn er durch eine zusammengesetzte leitende Flüssigkeit gesendet wird, bewirkt, daß die beiden Bestandteile dieser Flüssigkeit, die *Ionen*, sich an den Elektroden abscheiden, der positive Bestandteil, das *Kation* (das Metall resp. der Wasserstoff), an der Kathode, der Rest, das *Anion*, an der Anode. Das Grundgesetz der Elektrolyse, das bei allen Anwendungen derselben stets Gültigkeit hat, ist das *Gesetz von Faraday*, welches aussagt, daß die Menge der zersetzten Flüssigkeit, also auch die Menge der abgeschiedenen Ionen wächst mit der Stärke des Stromes und mit der Dauer des Stromdurchgangs und daß diese Mengen bei den verschiedenen Stoffen im Verhältnis von deren chemischen Äquivalenten stehen.

Da die chemischen Äquivalentzahlen für alle Substanzen bekannt sind, und da man aus Experimenten weiß, wie viel Kupfer der Strom 1 Ampere in 1 Sekunde oder Minute oder Stunde abscheidet (S. 373), so kann man sofort angeben, wie viel von jeder chemischen Substanz an einer Elektrode abgeschieden werden wird, wenn eine Elektrizitätsmenge gleich 1 Amperestunde (also der Strom 1 Ampere 1 Stunde lang, oder der Strom 5 Ampere $^1/_5$ Stunde lang u. s. w.) durch eine Lösung dieser Substanz hindurchgeht. Eine Reihe solcher Zahlen ist in folgender Tabelle zusammengestellt:

Durch 1 Amperestunde werden abgeschieden:

Name des Stoffes	mg	Name des Stoffes	mg
Aluminium	337,0	Nickel	731 1096
Blei	3858,4		
Eisen	1047 698	Platin	3632,4
		Silber	4025
Gold	2452	Zink	1217,2
Kupfer	1182 2364	Zinn	2221
		Chlor	1323
Magnesium	454,3	Jod	4730
		Sauerstoff	298

Bei einigen dieser Stoffe, nämlich Eisen, Kupfer, Nickel, sind zwei verschiedene Zahlen angegeben. Das kommt daher, daß diese Stoffe zwei verschiedene Äquivalentgewichte besitzen, je nach der Verbindung, in der sie stehen. Unter dem Äquivalentgewicht einer Substanz versteht man ja das Atomgewicht derselben (welches unveränderlich ist), dividiert durch die Valenz (Wertigkeit) der Substanz, welche eben in verschiedenen Verbindungen verschieden sein kann. Z. B. Kupfer ist gewöhnlich zweiwertig. Aus Schwefelsäure SO_4H_2 und Kupfer wird Kupfervitriol SO_4Cu, woraus man sieht, daß 1 Atom Kupfer 2 Atome Wasserstoff (H_2) ersetzt, daß also Kupfer hier zweiwertig ist. Eine solche Verbindung ist z. B. auch das Kupferchlorid $CuCl_2$, in welchem 1 Atom Kupfer mit 2 Atomen Chlor verbunden ist. Da nun das Atomgewicht des Kupfers 63,18 ist, wie die Chemie bestimmt hat, so ist das Äquivalentgewicht des Kupfers in solchen Verbindungen 31,59. Dagegen gibt es andere Verbindungen des Kupfers, die sogenannten Oxydulverbindungen oder Kuprosalze, in denen das Kupfer einwertig ist. Eine solche Verbindung ist das wichtige Kupferchlorür $CuCl$ (oder Cu_2Cl_2), in welchem 1 Atom Kupfer mit 1 Atom Chlor verbunden ist. In diesen Verbindungen ist daher das Äquivalentgewicht doppelt so groß, nämlich 63,18 und daher wird durch den Strom 1 Ampere aus ihnen in einer Stunde doppelt so viel Kupfer (nämlich 2364 mg) abgeschieden, wie aus den anderen Verbindungen, die man Oxydverbindungen oder Kuprisalze nennt, und bei denen diese Menge bloß 1182 mg beträgt. Zu den Oxydulverbindungen des Kupfers gehört außer dem Kupferchlorür noch das Kupferjodür CuJ, das Kupferoxydul Cu_2O und das Kupfersulfür Cu_2S, welches letztere nichts anderes als der natürlich vorkommende Kupferglanz ist.

Ähnlich ist es beim Eisen, nur daß das Eisen nicht ein- oder zweiwertig, sondern zwei- oder dreiwertig ist. Aus Schwefelsäure SO_4H_2 und Eisen Fe wird Eisenvitriol SO_4Fe, wobei also das Eisen zweiwertig ist. Diejenigen Verbindungen, in welchen das Eisen zweiwertig ist, nennt man Oxydulverbindungen (oder Ferrosalze). Zu diesen gehört außer dem Eisenvitriol das Eisenchlorür $FeCl_2$, das Eisenoxydul FeO, das kohlensaure Eisen CO_3Fe (Spateisenstein), das Eisensulfür FeS. Dagegen in anderen Verbindungen ist das Eisen dreiwertig, und diese nennt man Oxydverbindungen oder Ferrisalze. Zu ihnen gehört das Eisenchlorid $FeCl_3$ (oder besser Fe_2Cl_6) und das Eisenoxyd Fe_2O_3 (Roteisen-

stein). Das Atomgewicht des Eisens ist 55,88, also ist das Äquivalentgewicht desselben in den Ferrosalzen 27,94, in den Ferrisalzen 18,63, so daß aus den Ferrosalzen durch 1 Amperestunde 1047 mg, aus den Ferrisalzen aber nur 698 mg abgeschieden werden. Ebenso ist Nickel zwei- oder dreiwertig.

Hat man nun irgend eine Metallsalzlösung in einem Gefäß (Bad) und sendet man einen Strom durch das Bad, welches ja einen bestimmten Widerstand hat, so gehört zunächst eine bestimmte Spannungsdifferenz dazu, um den Strom überhaupt durch den Widerstand zu senden. Diese Spannung ist nach S. 70 gleich der Stromstärke multipliziert mit dem Widerstand des Bades; denn so groß ist der Spannungsverlust, den der Strom erleidet, wenn er nur den bestimmten Widerstand überwindet.

Außerdem aber entsteht ja, wie wir wissen, stets, wenn durch einen Elektrolyten ein Strom hindurchgesendet wird, eine elektromotorische Gegenkraft, die der Polarisation, und die Spannung des Stromes, der durch den Elektrolyten geht, muß also diese Polarisation auch noch überwinden, d. h. also die gesamte Spannung des Stromes, durch den Elektrolyse erfolgen soll, muß mindestens gleich sein der Summe

1. aus der elektromotorischen Kraft der Polarisation und
2. dem Spannungsverlust infolge des Widerstandes des Bades.

Wenn man z. B. einen Strom mittels Platinelektroden durch eine Lösung von Kupferchlorid gehen läßt, so hat die entstehende Polarisation eine elektromotorische Kraft von 1,35 Volt. Hat nun das Bad einen Widerstand von 0,5 Ohm und läßt man Ströme von 1, 2, 3 Ampere hindurchgehen, so ist der Spannungsverlust im Bad 0,5; 1; 1,5 Volt, also ist der gesamte Spannungsunterschied an den beiden Enden des Bades gleich

1,85; 2,35; 2,85 Volt.

Von der Spannung, von der Zahl der Volt, die man zu einem elektrolytischen Prozeß braucht, und von der Stromstärke hängen aber wesentlich die Kosten des Prozesses ab. Denn der Effekt des Stromes, d. h. die Arbeit pro Sekunde, die der Strom in dem elektrolytischen Bad leistet, ist ja immer gleich:

Anzahl der Volt $\times$ Anzahl der Ampere.

Um diesen Effekt zu erzeugen, muß man entweder eine Dynamomaschine treiben oder galvanische Elemente anwenden, in denen Zink verbrannt wird, d. h. den Effekt muß man durch Aufwand von Kosten hervorbringen. Die nutzbare Leistung bei dem elektrolytischen Prozeß hängt aber von der Menge der abgesetzten Ionen, also nach dem Faradayschen Gesetz nur von der Stromstärke ab. Man sieht daraus, daß die nutzbare Leistung um so größer wird im Verhältnis zum Gesamtaufwand, je kleiner die notwendige Spannung ist.

Wir haben also als erste Folgerung:

Ein elektrolytischer Prozeß wird um so vorteilhafter sein, je geringer die notwendige Spannung des Stromes ist.

Sehr drastisch kann man die eben erörterte Tatsache so ausdrücken,

daß man sagt, bei einem technischen elektrolytischen Prozeß bringen die Ampere Geld und die Volt kosten Geld.

Es kommt also für einen ökonomischen Betrieb wesentlich darauf an, die Volt, die Spannung des Bades, möglichst klein zu machen. Die Spannung setzt sich aber, wie eben erwähnt, aus zwei Teilen zusammen, der Widerstandsspannung und der Polarisationsspannung, wie man sie kurz nennen kann.

Da nun die zur Überwindung des Widerstandes des Bades notwendige Spannung, die Widerstandsspannung, nicht veränderlich ist, wenn der Widerstand der Substanz einmal gegeben ist — sie ist ja gleich dem Produkt aus der angewandten Stromstärke und diesem Widerstand — so sieht man, daß es wesentlich darauf ankommt, die Polarisationsspannung zu vermindern, d. h. *die Polarisation bei dem Prozesse möglichst klein zu machen.*

Man kann das auch auf folgende Weise einsehen. Wenn wir einen galvanischen Strom in dem Bad haben, der gerade 1 Pferdekraft Effekt hat, also 736 Watt nach S. 369, *und wenn wir annehmen, daß die notwendige Spannung zum Betriebe des Prozesses in jedem Falle gerade 1 Volt wäre,* so können wir aus den oben S. 597 angeführten Zahlen berechnen, wieviel Kilo der einzelnen Substanzen durch 1 Pferdekraft pro Stunde abgeschieden werden. Der Strom hätte nämlich dann die Stärke von 736 Ampere, und wir brauchen die obigen Zahlen bloß mit 736 zu multiplizieren, und statt in Milligramm in Kilo auszudrücken. Das gibt folgende Resultate:

Durch 1 Pferdekraft werden pro Stunde ausgeschieden (wenn die Spannung des Bades 1 Volt betragen würde):

Aluminium	0,248 Kilo	Nickel	0,538 Kilo
Blei	2,893 „		0,807 „
Eisen	0,770 „	Platin	2,673 „
	0,513 „	Silber	2,962 „
Gold	1,804 „	Zink	0,896 „
Kupfer	0,870 „	Zinn	1,635 „
	1,740 „	Chlor	0,974 „
Magnesium	0,334 „	Jod	3,481 „
		Sauerstoff	0,219 „ .

Ist aber die notwendige Spannung des Bades nicht 1 Volt, sondern, wie z. B. bei Nickelsalzen, 4 Volt, so wird durch eine Pferdestunde nicht 0,538, sondern nur 0,135 Kilo abgeschieden. Je größer die notwendige Spannung ist, desto kleiner ist also die pro Pferdekraft und Stunde abgeschiedene Menge der Metalle, und umgekehrt.

Für einen möglichst nutzreichen elektrochemischen Betrieb ist also die notwendige Bedingung, daß die Polarisation im Bade möglichst klein gemacht werde. Nun beruht die Polarisation darauf, daß die beiden Elektroden des Bades infolge der Elektrolyse chemisch different gegeneinander sind. Je verschiedener die beiden Elektroden gegeneinander sind, d. h. je weiter sie in der Spannungsreihe auseinanderstehen, desto größer ist die Polarisation.

Man kann das aber auch noch in anderer Weise auffassen. Wenn ein Strom durch den Elektrolyten hindurchgeht und dessen Ionen trennt, so muß er eine bestimmte Arbeit leisten. Diese Arbeit ist so groß wie die sogenannte Wärmetönung des betreffenden Prozesses, nur daß diese gewöhnlich in Kalorieen, im Wärmemaß ausgedrückt ist, während man die Arbeit in Kilogrammetern mißt. Man braucht aber bekanntlich bloß die (kleinen) Kalorieen mit 0,435 zu multiplizieren, um sie in Kilogrammeter umzuwandeln. Also z. B. wenn Kupfersulfat $CuSO_4$ in wässeriger Lösung zersetzt werden soll, so braucht man dazu eine Arbeit von 55 960 kleinen Kalorieen oder

$$55960 \times 0{,}435 \text{ Kilogrammeter}$$

für je ein zerlegtes Grammolekül Kupfersulfat (d. h. für 159 g, entsprechend der Formel $CuSO_4$). Diese Arbeit muß der Strom leisten, diese Arbeit steckt aber dann auch wieder aufgespeichert in der elektrolytischen Zelle. Es scheidet sich eben an der einen Elektrode das Kupfer, an der anderen die Schwefelsäure ($SO_3 + O$) aus. Diese Substanzen polarisieren die Elektroden und in der Polarisation steckt eben wieder eine Quelle von Arbeitsmöglichkeit, denn die polarisierten Elektroden können, wenn sie verbunden werden, wieder einen Strom, den Polarisationsstrom erzeugen, können also Arbeit leisten. Wenn man nun aber die abgeschiedenen Substanzen, welche als freie Ionen zum Teil sehr reaktionsfähig sind, an den Elektroden nicht frei auftreten läßt, sondern sie neue Verbindungen eingehen läßt, so entsteht wieder eine Wärmemenge statt der vorher verbrauchten, und infolgedessen ist die zur Elektrolyse notwendige Wärmemenge nun kleiner als vorher, folglich ist auch die in der Zelle aufgespeicherte Arbeit dann kleiner als vorher, d. h. die Polarisation ist geringer.

Damit haben wir das Mittel gefunden, durch welches wir die Polarisation verkleinern können. Wir müssen es so einrichten, daß die Ionen an der einen oder an beiden Elektroden neue Verbindungen eingehen, die eine der zu überwindenden Wärmetönung möglichst gleiche erzeugen.

Ein Zahlenbeispiel wird das klar machen. Wenn wir eine Zelle mit Kupfervitriollösung haben und als Elektroden Platinplatten verwenden, so brauchen wir zur Zersetzung des Kupfervitriols, wie oben angegeben, 55 960 × 0,435 Kilogrammeter Arbeit für je ein Grammolekül, das sind hier 2 Äquivalente Kupfer, die sich abscheiden. Diese 24 343 Kilogrammmeter Arbeit für je 2 abgeschiedene Äquivalente Kupfer stecken nun aufgespeichert in der Zelle und zwar in der Form der Polarisation. Fließt der Polarisationsstrom, so kann er also wieder dieselbe Arbeit leisten. Daraus können wir zunächst die elektromotorische Kraft der Polarisation berechnen. Ein Strom nämlich, der 2 Äquivalente Kupfer abscheidet, muß (nach S. 143) 2 × 96 540 Coulomb mit sich führen. Nun ist aber die Zahl der Volt mal der Zahl der Coulomb (hier eben: 2 × 96 540) dividiert durch 9,81 gleich der von dem Strom geleisteten Arbeit in Kilogrammmetern (hier also: 24 343), also ist in unserem Fall die Zahl der Volt gleich $\frac{24\,343 \times 9{,}81}{2 \times 96\,540} = 1{,}56$. So groß wäre also die elektromotorische Kraft der Polarisation, wenn keine Nebenprozesse stattfinden.

Macht man nun aber die Anode nicht aus Platin, sondern aus Kupfer und schickt man jetzt einen Strom hindurch, so verbindet sich sofort das Anion SO_4 mit dem Kupfer zu neuem Kupfersulfat und infolgedessen *entsteht* nun wieder eine Wärmetönung von 55 960 Kalorieen, also hebt sich die vom Strome bei der Ausscheidung des Kupfers (an der Kathode) geleistete und die bei der Auflösung des Kupfers (an der Anode) gewonnene Wärmetönung auf, mithin steckt jetzt keine Arbeit mehr aufgespeichert in der Zelle, d. h. die Polarisation ist nun gleich Null geworden. In der Tat hat man jetzt keine Polarisation mehr, weil nun eine Kupferplatte und eine mit Kupfer bedeckte Platinplatte in die Flüssigkeit tauchen, die keine elektrische Differenz haben.

Das Mittel also, um mit möglichst niedrigen Spannungen auszukommen, besteht darin, daß man Vorsorge trifft, daß die Ionen an den Elektroden die Möglichkeit vorfinden, in chemische Verbindungen einzutreten (die natürlich dem Prozeß nicht schädlich sein dürfen), oder mit anderen Worten, *man muß den Ionen Gelegenheit geben, an den Elektroden Arbeit zu leisten.*

Da bei den metallurgischen Prozessen das Kation (das Metall) dasjenige Produkt ist, dessen Reindarstellung man wünscht, so handelt es sich also wesentlich darum, an der *Anode* chemische Arbeitsgelegenheit zu schaffen. An der Anode tritt nun immer derjenige Bestandteil des Elektrolyten auf, welcher *oxydierend wirkt*, also z. B. SO_4 oder NO_3 oder Cl u. dergl. *Man muß daher für reichliche Oxydationsarbeit an der Anode Sorge tragen.* Das wird man in vielen Fällen dadurch erreichen, daß man als Anode eine Substanz in das Bad bringt, welche durch die Wirkung des Anions selbst aufgelöst wird und dadurch möglichst dieselbe Verbindung entstehen läßt, welche elektrolysiert wird, wie in unserem Beispiel eine Kupferplatte. Man kann aber auch das Anion zunächst auf die elektrolytische Flüssigkeit wirken lassen, nicht auf die Anode, und diese in zweckmäßiger Weise oxydieren lassen. Wir werden Beispiele von beiden Methoden unten kennen lernen.

Mit dieser Betrachtung hängt noch folgende wichtige Frage zusammen. Für einen elektrolytischen Prozeß mit gegebenen Elektroden ist nicht jede Stromstärke gleich gut geeignet, sondern es muß vielmehr die Stromstärke in einem passenden Verhältnis zu der Oberfläche der Elektroden stehen. Um das einzusehen, nehmen wir wieder an, daß wir Kupfervitriol zersetzen, und daß die Anode aus Kupfer besteht. Die Anode habe eine bestimmte Oberfläche, z. B. von $^1/_2$ qm. Wenn der Strom hindurchgeht, so tritt an der Anode SO_4 auf, welches sie auflöst und zu $CuSO_4$ umwandelt. Je stärker der Strom ist, desto mehr SO_4 tritt in gleicher Zeit auf, desto mehr $CuSO_4$ wird also entwickelt. Das geht aber natürlich nur so lange fort, bis nicht die Abscheidung von SO_4 eine zu reichliche ist. Ist sie nämlich zu groß, d. h. ist die Stromstärke zu groß, so findet das SO_4 nicht mehr eine genügende Fläche an der Anode vor, um das Kupfer aufzulösen. Daraus sieht man, daß je nach der Größe der Anode man höchstens eine bestimmte Stromstärke anwenden darf, um den Prozeß zweckmäßig zu führen. Ist die Anode doppelt so groß, also in unserem Falle 1 qm, so kann man natürlich auch die doppelte Stromstärke anwenden. Man bezeichnet

das Verhältnis der Stromstärke zur Größe der Anodenfläche als die Stromdichtigkeit und muß also sagen, für jeden Prozeß ist eine maximale Stromdichtigkeit vorhanden, die ohne Schaden nicht überschritten werden kann. Die Stromdichtigkeit wird gewöhnlich angegeben als Zahl der Ampere pro Quadratmeter Anodenfläche.

Dieselbe Betrachtung gilt aber auch für die Kathode. Auch da ist die Stromdichtigkeit von wesentlichem Einfluß auf das Produkt der Elektrolyse. Ist z. B. die Stromstärke zu groß im Verhältnis zur Größe der Kathode, so scheidet sich zu viel Metall ab, und dieses kann dann häufig bei seiner Entstehung das Wasser mehr oder minder zersetzen. Es bildet sich dann kein kompakter Niederschlag des Metalls, sondern ein schwammiger oder poröser. Also ist eine weitere Forderung für jeden elektrochemischen Prozeß, daß man die günstigste Stromdichte durch Versuche ermittelt. Es kann der Fall vorkommen, daß eine bestimmte Stromstärke zwar für die Anode gerade passend ist, für die Kathode aber zu klein oder zu groß ist. Dann muß man eben die Fläche der Kathode kleiner oder größer machen als die Anodenfläche.

Nach diesen allgemeinen Betrachtungen gehen wir nun dazu über, einige wichtige elektrochemische Prozesse zu besprechen, die bisher in die Praxis eingeführt wurden.

Am längsten wird die Elektrolyse benutzt zur Gewinnung des Reinkupfers, nicht aus den natürlich vorkommenden Kupfererzen selbst, sondern aus dem sogenannten Schwarzkupfer, welches aus den natürlichen Erzen durch hüttenmännisches Verfahren erhalten wird. Das Schwarzkupfer enthält hauptsächlich Kupfer, aber dabei noch Verunreinigungen von Schwefelkupfer, Schwefeleisen, auch von Silber, Platin, Gold, Wismut, Zinn etc. Es handelt sich darum, aus diesem unreinen Kupfer durch Elektrolyse ganz reines — daher viel wertvolleres — Kupfer zu erhalten und zugleich die wertvolleren Beimischungen, Silber etc., zu gewinnen.

Zu dem Zweck wird das Schwarzkupfer in Form von großen dicken Platten gegossen und diese werden als positive Elektrode (Anode) in ein Bad von schwefelsaurem Kupfer, das noch sauer ist, gestellt. Als negative Elektrode dient eine gleich große, dünne Scheibe von reinem Kupfer. Wird ein Strom durch das Bad geschickt, so löst sich das unreine Kupfer in der durch die Elektrolyse an ihm auftretenden Schwefelsäure auf, während das reine Kupfer an der negativen Elektrode sich abscheidet, wenn man die Stromstärke passend wählt. Man rechnet für jeden Quadratmeter Elektrodenfläche 50 bis 100 Ampere. Aus der positiven Elektrode gehen die Verunreinigungen teilweise in die Kupfervitriollösung (Lauge), teilweise setzen sie sich zu Boden. So erhält man bei Schwarzkupfer Silber, Zinn, Wismut, Gold, Platin, Blei in geringen Mengen, welche sich im Schlamm niedersetzen und eventuell aus diesem besonders gewonnen werden können. In dem Hüttenwerk zu Ocker i. S., wo diese elektrolytische Reinigung des Kupfers zuerst angewendet wurde, erzeugt man schon lange auf diese Weise ein vorzüglich reines Kupfer, sogenanntes Elektrolytkupfer. Jetzt wird diese Methode in einer großen Reihe von Kupferhütten angewendet.

Wichtig ist bei diesem Prozeß eine sorgfältige Bewegung der Lauge.

Je größer die fremden Beimengungen in der Anode sind, desto größer ist die elektromotorische Kraft der Polarisation. Je unreiner also das Kupfer ist, desto größer ist die notwendige Spannung, desto weniger lohnend ist also diese Anlage. Sie ist am zweckmäßigsten, wenn in dem Rohkupfer nicht mehr als 1/2 Proz. Unreinheiten enthalten sind.

Die notwendige Spannung, um die Polarisation zu überwinden, ist, wenn die Lauge noch sauer und nicht stark verunreinigt ist, bei Schwarzkupfer 0,12 Volt. Diese Spannung ist, wie man sieht, sehr gering, eben weil an der Anode wieder Kupfer aufgelöst wird.

Das so gewonnene Elektrolytkupfer wird zum Gebrauch erst geschmolzen, weil es direkt spröde und zerbrechlich ist infolge von kristallinischer Struktur. Seit der Einführung der elektrolytischen Kupferdarstellung ist es erst möglich, im Handel ganz reines Kupfer, eben das Elektrolytkupfer, zu beziehen, welches für viele Zwecke, namentlich auch für elektrotechnische Zwecke wegen seiner ausgezeichneten Leitungsfähigkeit die unreinen Kupfersorten allmählich immer mehr verdrängt.

Ebenso wie man hier die Elektrolyse benutzt, um reines Kupfer aus unreinem darzustellen, ebenso verwendet man den elektrischen Strom auch, und in derselben Weise, zur Reindarstellung anderer, namentlich edler Metalle. Diese elektrische Raffinierung der Metalle wird bei Gold und Silber im großen angewendet, auch für Blei und Zink wird sie praktisch durchgeführt.

Die Elektrolyse des Kupfers gibt auch die Mittel an die Hand, um direkt Kupferröhren ohne Naht herzustellen. Dies geschieht nach dem Verfahren von Elmore, welches in Leeds in England und in Schladern an der Sieg praktisch ausgeführt wird. Bei diesem Verfahren befindet sich in dem Bad aus schwefelsaurem Kupfer als negative Elektrode eine Eisenwalze, welche fortwährend gedreht wird und auf welcher das Kupfer niedergeschlagen wird. Als positive Elektrode wird sogenanntes Chilikupfer genommen, welches vorher durch Schmelzen und rasches Eintropfen in Wasser zu Kupferschrot gemacht wird. Dasselbe befindet sich auf einem Sieb aus Kupferdraht am Boden des Bades. Während der Elektrolyse gleitet ein Achatstein fortwährend an der rotierenden Walze hin und her und macht dadurch das gefällte Kupfer glatt und dicht. Der Strom wird der rotierenden Walze durch schleifende Bürsten zugeführt. Jedes Bad wird mit 1 Volt Spannung betrieben. Die Stromstärke kann eine sehr hohe sein, da die einzelnen abgelagerten Kupferschichten durch den Achat zusammengepreßt werden, so daß der Kupferniederschlag eine sehr hohe Dichte bekommt. Nach etwa 144 Stunden ist eine Schicht von 3,2 mm Wandstärke auf der Eisenwalze vorhanden. Hat der Kupferniederschlag die gewünschte Dicke gewonnen, so wird der Eisenkern durch geeigneten Walzendruck und Erwärmung herausgeschoben und die Kupferröhre ohne Naht ist fertig. Die so erzeugten Röhren haben eine sehr große Zugfestigkeit. Wichtig ist bei diesem Verfahren, daß die Form, die Eisenwalze, vollkommen glatt ist; jede Unregelmäßigkeit der Oberfläche der Walze hat unbrauchbare Röhren zur Folge.

Bei den bisher beschriebenen Verfahren wird durch Elektrolyse

also nur schon ziemlich reines Kupfer ganz gereinigt und eventuell sofort in passende Form gebracht. Eine noch wichtigere Aufgabe ist aber die, direkt aus den Kupfererzen (also nicht erst aus dem Produkt Schwarzkupfer) das reine Kupfer zu gewinnen. Diese Aufgabe ist von verschiedenen Seiten zu lösen versucht worden. Die praktischen, nicht die prinzipiellen Schwierigkeiten sind aber bei dieser und ähnlichen Aufgaben sehr große, so daß Prozesse, die auf dem Papier sich sehr leicht gestalten, in Wirklichkeit oft unausführbar sind. Bei der Kupfergewinnung haben verschiedene, lange Zeit im praktischen Großbetriebe durchstudierte Verfahren schließlich wieder eingestellt werden müssen.

Auch für die anderen schweren unedlen Metalle hat man versucht, sie aus den Erzen elektrisch zu gewinnen, doch hat sich bei ihnen der elektrische Betrieb noch wenig eingebürgert. Nur die Raffinierung derselben geschieht, wie oben erwähnt, auf elektrischem Wege.

Praktische Verwendung hat die Elektrolyse dagegen erhalten zur Abscheidung des Zinns aus den Abfällen von Weißblech (verzinntes Eisen), welche 3—9 Proz. Zinn enthalten. Diese Weißblechabfälle werden in Eisenkörbe verpackt und in die Bäder gesenkt. In den Bädern befindet sich Natronlauge. Die Körbe werden während des Betriebes auf und ab bewegt, damit die Lauge überall hinkommt. Die Eisenkörbe mit den Weißblechabfällen dienen als Anoden, als Kathoden werden neben die Körbe Eisenbleche gestellt. Das Zinn wird dann durch den Strom von den Anoden abgelöst und auf den Kathoden niedergeschlagen. Die Spannung an den Bädern beträgt kaum 2 Volt, die Stromdichte 30 Ampere pro Quadratmeter. Das Zinn schlägt sich anfangs schwammig nieder, nachher wird es pulverig und kristallinisch in Form von Nadeln. Es ist reiner als gewöhnliches Zinn, wie es im Handel zu haben ist.

Einen Erfolg hat die Elektrochemie zu verzeichnen bei der Gewinnung des Goldes. In einer Reihe von Goldminen in Transvaal wird im großen Stil der sogenannte Siemensprozeß ausgeführt, dessen technische und finanzielle Resultate höchst zufriedenstellend sind. Der Siemensprozeß besteht in folgendem: Die goldhaltigen Erze und Rückstände werden mit einer sehr verdünnten Lösung von Cyankali behandelt, welche das Gold auflöst. Diese Cyangoldkalilösung wird dann durch den Strom elektrolysiert, so daß das Gold sich auf Bleiplatten niederschlägt. Von diesen wird es in bekannter Weise abgetrieben. In der Anwendung des Cyankalis zum Lösen des Goldes ähnelt das Verfahren dem sogenannten Cyanidprozeß, welcher vielfach benutzt wird. Bei diesem Prozeß wird aber das Gold aus der Cyanlösung durch Zinkspäne gefällt, während es bei dem Siemensprozeß durch Elektrolyse gefällt wird. Die Folge dieses Unterschiedes ist die, daß beim Cyanidprozeß viel konzentriertere Cyankalilösungen angewendet werden müssen (von zirka 0,3 Proz.) als bei dem Siemensprozeß, wo sie nur 0,05, ja sogar nur 0,01 Proz. Cyankali enthalten. Bei dem hohen Preis des Cyankali macht dies viel aus. Außerdem scheidet sich bei dem Cyanidprozeß das Gold als loses Pulver auf den Zinkspänen ab, während es hier als fester Niederschlag auf den Bleiplatten erscheint. Bei dem Siemensprozeß werden die goldhaltigen Substanzen (Erze oder

Tailings) in möglichst feines Pulver verwandelt; dann werden sie mit der Cyankalilösung in eisernen Gefäßen von zirka 100 cbm übergossen und dadurch wird das Gold ausgelaugt. Die Goldlauge wird dann in eiserne Fällungsbehälter von zirka 20 cbm Inhalt eingelassen und dort wird sie elektrolysiert. Dabei dienen als Kathoden, wie gesagt, Bleiplatten, als Anoden aber dienen Eisenbleche. Durch die Lauge wird dieses Eisen aufgelöst und Berlinerblau gebildet, welches aber wieder in Cyankali übergeführt wird. Von dem Goldgehalt der Rückstände werden auf diese Weise zirka 70 Proz. gewonnen. Dieser Siemensprozeß gestattet die Ausbeutung sehr schwach goldhaltiger Massen.

Das Gemeinschaftliche bei allen diesen Verfahren, um Schwermetalle mit Hilfe des elektrischen Stromes zu erhalten, ist das, daß die Metalle aus den Lösungen ihrer Salze abgeschieden werden können.

Dieses Verfahren läßt sich nun bisher nicht anwenden bei den Leichtmetallen. Diese wirken im Entstehungszustande immer zersetzend auf das Wasser und können daher aus den Lösungen nicht elektrolytisch erhalten werden. Vielmehr muß man hier die Abscheidung der Metalle aus den geschmolzenen, feurig-flüssigen Verbindungen der betreffenden Metalle vornehmen.

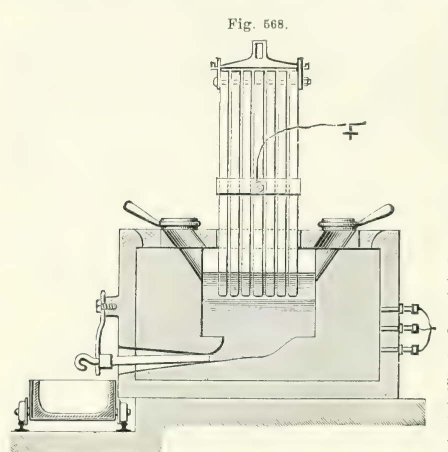
Im kleinen ist so die Darstellung fast aller dieser Metalle gelungen. Für den Großbetrieb aber sind teils die bisherigen Methoden noch nicht brauchbar, teils haben diese Metalle auch nicht so große Verwendbarkeit, daß ihre Darstellung in großen Mengen lohnen würde.

Die einzigen Metalle dieser Klasse, deren Fabrikation im großen tatsächlich vorgenommen wird, sind das Aluminium, das Natrium, das Kalium und das Magnesium, ja es ist eigentlich erst, seitdem man auf elektrischem Wege das Aluminium billig herzustellen lernte, dieses Metall Gegenstand des täglichen Gebrauchs geworden. Das Aluminium hat eben so außerordentlich wertvolle Eigenschaften, daß in vielen Fällen das Eisen und das Kupfer völlig von dem Aluminium verdrängt werden. Auch Legierungen des Aluminiums mit Kupfer und Zink, die sogenannten Aluminiumbronzen, haben sehr wertvolle Eigenschaften.

Zur Erzeugung des reinen Aluminiums ist in Neuhausen in der Schweiz ein Verfahren in Gebrauch, welches dort von der Aktiengesellschaft für Aluminiumindustrie angewendet wird. In Neuhausen sind nämlich von den Kräften des Rheinfalles über 2000 Pferdekräfte nutzbar gemacht, um die Dynamomaschinen zu betreiben, welche den Strom liefern, der einerseits die Salze feurig-flüssig macht und andererseits sie elektrolysiert. Die neueren Einrichtungen bei dieser Fabrikation werden geheim gehalten. Im Prinzip geschieht aber die Herstellung des Aluminiums in folgender Weise. In einen großen Kohlentiegel, wie ihn Fig. 568 zeigt, der außen mit Eisen verschalt ist, wird das Fluordoppelsalz von Aluminium und Natrium gebracht, dem dann während des Betriebes fortwährend Tonerde in geeigneter Menge zugesetzt wird. Der Kohlentiegel bildet die Kathode, als positive Elektrode dient das oben in der Figur sichtbare Bündel von Kohlenplatten. Der Tiegel hat seitlich zwei schräge Schachte, durch welche die Tonerde eingeführt wird, und unten eine durch einen Kohlenstab verschließbare Öffnung, aus welcher das ge-

bildete Metall abgelassen werden kann. Die positive Elektrode wird zunächst bis zur Berührung mit der negativen heruntergelassen und dann, während der Strom durchgeht, gehoben. Es bildet sich ein Lichtbogen, der das Aluminiumsalz schmilzt. Ist dieses erreicht, so wird die Anode weiter in der Schmelze in die Höhe gehoben, so daß der Lichtbogen aufhört und nun die Elektrolyse beginnt. Durch die Joulesche Wärme wird die Masse dabei immer flüssig erhalten. Es wird bei diesem Prozeß ein Strom von 5 bis 8 Volt Spannung, aber von 12 000 Ampere Stromstärke angewendet. Aus der geschmolzenen Tonerde scheidet sich durch Elektrolyse das Aluminium an dem Tiegel ab. Durch dieses Verfahren wird Aluminium in solchen Mengen dargestellt, daß sein Preis von 200 auf 3 Mark für 1 kg gesunken ist.

Fig. 568.



Zu dieser Aluminiumgewinnung werden kolossale Dynamomaschinen in Neuhausen benutzt, von denen jede bis zu 7500 Ampere Stromstärke liefert.

Im großen wird jetzt das metallische Natrium auf elektrischem Wege hergestellt, indem man durch Feuer geschmolzenes Ätznatron elektrolysiert. Man verwendet kleine Kathoden aus Eisen, so daß eine sehr hohe Stromdichte entsteht, und entfernt das durch Elektrolyse entstandene Natrium regelmäßig. Ähnlich wird auch metallisches Kalium erzeugt.

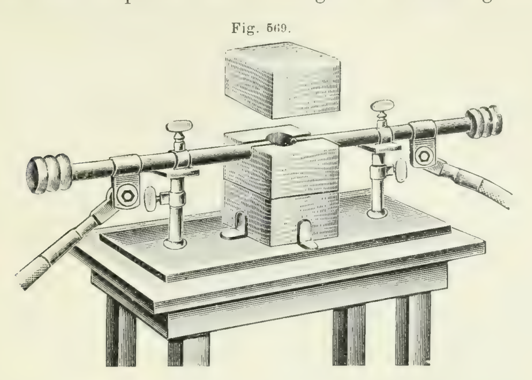
Das Magnesium wird in ähnlicher Weise wie das Aluminium durch Elektrolyse des geschmolzenen Kalium-Magnesiumchlorids von einer Aktiengesellschaft in Bremen hergestellt. Die Anwendung dieses Metalls hat dadurch, daß die Legierung Magnalium, die Magnesium und Aluminium enthält, sich recht guten Eingang in die Technik verschafft hat, einen erheblichen Aufschwung genommen.

Bei der Gewinnung des Aluminiums, des Natriums und des Magnesiums ist es also direkt die Joulesche Wärme, die in dem Elektrolyten beim Stromdurchgang entwickelt wird, welche die Verflüssigung desselben hervorbringt, worauf dann die Elektrolyse eintritt.

Auch in anderen Fällen werden jetzt die hohen Temperaturen, die man durch den elektrischen Lichtbogen erhält, zur Erzeugung chemischer Stoffe, sei es durch Verbindung, sei es durch Zerlegung, benutzt. Diese Methode ist hauptsächlich von dem französischen Chemiker Moissan ausgegangen, der weitreichende und große Untersuchungen unter Anwendung des Lichtbogens gemacht hat. Er konstruierte sich

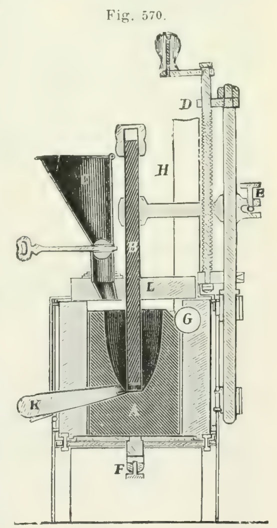
für seine Zwecke einen elektrischen Schmelzofen, in welchem direkt die hohe Temperatur des Lichtbogens zur Erzielung chemischer

Fig. 569.



und physikalischer Prozesse benutzt wurde. Die Ansicht eines solchen Ofens ist in Fig. 569 gegeben. Der Ofen besteht aus einem dreiteiligen Block aus Magnesit oder Schamotte, von denen der oberste den Deckel bildet. Die beiden starken Kohlen sind horizontal in den zweiten Block eingeführt, in welchem die zu schmelzende Substanz sich in einem Tiegel aus Kohle oder Magnesit oder geschmolzener Magnesia, je nach der zu erzielenden Temperatur, befindet. An die Kohlen werden seitlich die Zuleitungskabel von der Stromquelle befestigt. Diese Öfen werden von der Deutschen Gold- und Silberscheideanstalt in Frankfurt a. M. hergestellt.

Fig. 570.



In derartigen Öfen hat zuerst Moissan mit Strömen von 110 Volt Spannung und bis zu 1000 Ampere Stromstärke experimentiert. Im Betrieb werden die Kohlen selbst durchweg glühend und aus den Öffnungen schlagen weitreichende Flammen von 40 bis 50 cm Länge heraus. Da ein Strom von 110 Volt und 1000 Ampere einen Effekt von 110000 Watt hat, und da 736 Watt gleich einer Pferdekraft sind, so braucht man zum Betrieb eines solchen Lichtbogens ungefähr 150 Pferdekräfte. Bei noch stärkeren Strömen, solchen bis zu 2000 Ampere, halten die Öfen aus Kalk nicht mehr, der Kalk wird flüssig wie Wasser. In diesen Fällen fütterte Moissan die Vertiefung im Ofen mit Platten aus Magnesia und dahinter liegenden Kohlenplatten aus. Ein solcher Ofen gestattete natürlich

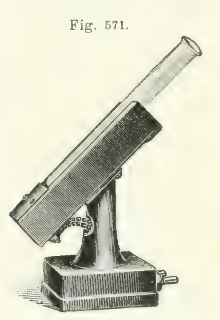
nur immer mit einer begrenzten Menge von Substanz zu arbeiten. Es werden aber jetzt von derselben Firma auch elektrische Öfen hergestellt, welche einen kontinuierlichen Betrieb gestatten. So zeigt z. B. Fig. 570 den Durchschnitt eines solchen Ofens. Der Tiegel A besteht entweder aus Kohle, wobei er zugleich als negative Elektrode dient, oder er besteht aus Magnesit, und dann wird der Strom durch einen Kohlenstab, der durch ein Loch in dem Tiegelboden geht, in diesen eingeführt. Bei F befindet sich die Klemme für das negative Stromkabel. Die positive Kohle B, die bei E mit dem positiven Kabel verbunden wird, kann durch die Schraube D gehoben oder gesenkt werden. Durch den Falltrichter C mit beweglichem Boden kann das zu verarbeitende Material nachgefüllt werden, während durch die Abstichöffnung bei K das geschmolzene Material entfernt werden kann. Etwaige Gase, die sich bei dem Prozeß bilden, entweichen durch die Öffnung G nach H.

In solchen Öfen gelingt es, eine große Reihe von Körpern im reinen Zustand in großen Quantitäten herzustellen, Chrom, Mangan, Molybdän, Wolfram, Uran, Vanadin, Zirkon, Titan, und ebenso deren Verbindungen zu studieren. Auch die Herstellung künstlicher Diamanten, allerdings in kleinen Quantitäten, war dadurch möglich.

Von besonderer Wichtigkeit, sowohl in theoretischer wie in praktischer Hinsicht, war die aus den Versuchen von Moissan fließende Kenntnis, daß sich bei diesen Temperaturen die meisten Metalle mit dem Kohlenstoff zu neuen Körpern chemisch verbinden. Diese Verbindungen nennt man allgemein Karbide, und Moissan stellte so Karbide von Lithium, Calcium, Baryum, Strontium, Cer, Lanthan, Yttrium, Thorium, Aluminium, Mangan, Uran, Silizium, Bor dar. Hervorragende praktische Wichtigkeit haben bisher nur erstens das Siliziumkarbid (Karborundum) erlangt, welches härter als alle anderen Körper ist und nur vom Diamanten wenig übertroffen wird und welches daher zum Schleifen der Körper vielfach Verwendung findet, vor allem aber zweitens das Calciumkarbid, welches man jetzt auch gewöhnlich, ohne nähere Bezeichnung, Karbid nennt. Bringt man nämlich ein Gemenge von Kalk (CaO) und Kohle (C) in solchem Verhältnis in den elektrischen Ofen, daß auf je 1 Molekül CaO (56 g) 3 Moleküle Kohlenstoff (36 g) kommen, so verbindet sich das Calcium mit dem Kohlenstoff zu Calciumkarbid (CaC_2) und es entweicht Kohlenoxyd (CO). Das entstehende Karbid ist eine dunkle, homogene Masse, die sich leicht spalten läßt. Die hervorragende Bedeutung des Calciumkarbids besteht darin, daß, wenn man es in Wasser bringt, sich sofort ein Gas, Acetylen, bildet und zwar reines Acetylen, wenn das Calciumkarbid rein ist. Es verbindet sich nämlich der Kohlenstoff (C_2) mit dem Wasserstoff des Wassers (H_2) zu Acetylen (C_2H_2) und das Calcium (Ca) des Karbids mit dem Sauerstoff (O) des Wassers zu Kalk (CaO). Das Acetylen, ein Kohlenwasserstoff, ist nun brennbar, und zwar brennt es mit viel hellerer Flamme als Leuchtgas. Da nun das Karbid ein fester, leicht transportabler Körper, und da die Reaktion mit Wasser eine so einfache ist, so hat sich dadurch in manchen Fällen eine neue Beleuchtungsart eingebürgert, nämlich die Beleuchtung mit Acetylengas, statt mit Leuchtgas. Eine Reihe von Unglücksfällen, die im Anfang bei dieser Acetylenbeleuchtung vorgekommen sind, hat zu genauerer Unter-

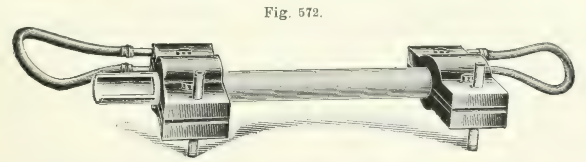
suchung der dabei vorhandenen Umstände geführt, und es wurde festgestellt, daß wenn das Acetylen unter einem Drucke steht, der den der Atmosphäre nur wenig übersteigt, daß es dann vollkommen gefahrlos ist, während es allerdings bei höheren Drucken zu sehr gefährlichen Explosionen Anlaß gibt. Die Acetylenindustrie, die sich in den letzten Jahren ziemlich ausbreitet, ist direkt aus der Elektrochemie hervorgegangen, insofern diese das Calciumkarbid auf einfache Weise und mit sehr großer Ausbeute liefert. Mit 1 Pferdekraft kann man in 24 Stunden 3,5 Kilo Karbid gewinnen. Das Karbid dient nicht bloß zur Acetylenerzeugung und dadurch für Beleuchtungszwecke, sondern es findet auch Anwendung für die Darstellung von Cyaniden, das sind Stickstoffverbindungen, die sich als Düngemittel eignen, ferner zur technischen Gewinnung von Ruß und wird aus diesen Gründen in großen Mengen hergestellt.

Fig. 571.



In der hohen Temperatur der elektrischen Öfen läßt sich ferner eine Verbindung von Kohlenstoff und Silicium herstellen, die praktisch wertvolle Eigenschaften besitzt. Wird nämlich Kohle mit Silicium bei hoher Temperatur (1800 bis 1900^0) erhitzt, so dringen die Siliciumdämpfe in die Kohle ein und es bildet sich silizierte Kohle, welches Material von der Fabrik Prometheus in Frankfurt a. M., die es fabriziert, den Namen Silundum erhalten hat. Das Silundum hält hohe Temperaturen bis 1600^0 aus, sein elektrischer Widerstand ist größer als der der Kohle, so daß es vorteilhaft für elektrische Heizapparate, die hohen Temperaturen ausgesetzt werden sollen, verwendet wird. Die Fabrik Prometheus stellt Heizuntersätze, Öfen, Reagenzglaswärmer, Glührohre aus Silundum her. Fig. 571 zeigt einen solchen Reagenzglaswärmer, Fig. 572 ein Glührohr mit durch Wasser gekühlten Elektroden.

Fig. 572.



Die elektrischen Öfen haben in den letzten Jahren eine weitgehende Anwendung gefunden zur Herstellung von Eisenlegierungen und von Stahl. So wird nach einem Verfahren, welches ähnlich ist wie das bei der Aluminiumerzeugung angewendete, durch Zusammenschmelzen von Chrom und Eisen Chromstahl verfertigt, welcher für Panzerplatten gebraucht wird. Besonders aber werden die elektrischen Öfen zur Herstellung von Stahl aus Roheisen oder namentlich zur Herstellung von Stahl besonderer Qualität aus gewöhnlichem Stahl verwendet und diese Anwendung hat sich ökonomisch sehr bewährt. Dabei werden, um das geschmolzene Eisen von der Berührung mit Kohle zu schützen, die elektrischen Öfen als

Induktionsöfen benutzt, d. h. das Eisen resp. der Stahl wird direkt durch die in ihnen erzeugten Induktionsströme in Fluß gesetzt resp. erhalten. Diese Öfen kann man als Transformatoren, und zwar gewöhnlich als ringförmig gestaltete, auffassen. Die primären Wickelungen werden von starken Wechselströmen durchflossen, während die sekundäre Wickelung aus einer röhrenförmigen Windung besteht, die aus dem flüssigen Eisen gebildet ist. Die Elektrostahlöfen von Kjellin und die von Röchling-Rodenhauser, welche mit Wechselstrom oder Drehstrom betrieben werden, erlauben mit verhältnismäßig geringem Aufwand von Energie Elektrostahl oder auch besonders vorzüglichen Tiegelstahl herzustellen.

Aber mit dieser Darstellung von reinen Metallen oder Metalllegierungen sind die Möglichkeiten, wie man die Wirkungen des Stromes benutzen kann, noch lange nicht erschöpft. Da bei jedem elektrolytischen Prozeß an der Kathode reduzierende, an der Anode oxydierende Stoffe entstehen, so kann man in sehr vielfältiger Kombination aus den elektrolysierten Substanzen neue bilden, welche von höherem Werte sind als die Ausgangsmaterialien. Es kommt eben nur darauf an, ob die Oxydationen und Reduktionen durch Vermittlung des Stromes billiger zu erzeugen sind, als durch rein chemische Oxydations- und Reduktionsmittel. Bisher hat sich schon in einer Reihe von Fällen das elektrolytische Verfahren billiger erwiesen, als andere rein chemische Verfahren, und dazu kommt noch der große Vorzug, daß man auf elektrischem Wege die Substanzen reiner erhält als auf anderen Wegen. In einer großen Anzahl von chemischen Fabriken Deutschlands und des Auslandes sind viele Zehntausende von Pferdekräften jetzt zur Erzeugung solcher chemischen Produkte mit Hilfe des elektrischen Stromes in Betrieb.

Da indes diese Verfahren, soweit sie wirklich praktisch benutzt werden, sehr geheim gehalten werden und eine Reihe von speziellen chemischen Kenntnissen voraussetzen, so sollen sie hier nicht näher angeführt werden.

Dagegen soll kurz das elektrolytische Bleichverfahren besprochen werden, welches zum Bleichen von Papier und Textilstoffen aller Art benutzt wird. Bei diesem Verfahren handelt es sich nur darum, eine Bleichflüssigkeit herzustellen. Mit dieser Flüssigkeit werden dann die Stoffe ebenso behandelt, wie z. B. mit einer bleichenden Chlorkalklösung. Um die Bleichflüssigkeit zu erzeugen, wird eine Kochsalzlösung elektrolysiert. Die Lösung wird in passende Gefäße gebracht, die man Elektrolyser nennt, und es wird ihr durch Elektroden, welche aus Platin oder Platiniridium bestehen, der Strom zugeführt. Die chemischen Prozesse, die beim Stromdurchgang durch einen solchen Elektrolyser stattfinden, sind ziemlich kompliziert und noch nicht genau aufgeklärt. Für die Verwendung ist allein wichtig, daß sich in der Flüssigkeit Verbindungen von Chlor und Sauerstoff bilden, nämlich Chlorsäure (ClO_5) und chlorige Säure (ClO_3), welche sehr brauchbare bleichende Eigenschaften haben. Sie geben nämlich ihren Sauerstoff an den Farbstoff der zu bleichenden Pflanzenfasern ab und bleichen diese.

In einem solchen Elektrolyser, der 30 Kilo Kochsalz enthält und durch einen Strom von 100 Volt und 25 Ampere betrieben wird, wird

pro Stunde so viel Bleichflüssigkeit erzeugt, als 1/2 Kilo bleichendem Chlor entspricht. Die Salzlösung wird so verdünnt genommen, daß die Bleichflüssigkeit nur 1 1/2 bis 2 Promille an wirksamem Chlor enthält. Die bleichende Wirkung einer derartigen Flüssigkeit ist so groß, daß dieser Prozeß an vielen Stellen praktisch eingeführt ist.

Solche Anwendungen des elektrischen Stromes dürften sich in Zukunft noch viele ergeben, wenn in diese neue Technik erst genügend erfindungsreiche Kräfte eingetreten sein werden, die sowohl in elektrischer wie namentlich in chemischer Denkweise sich gleich sicher bewegen können.

Eine ganz abweichende elektrische Erzeugungsweise wird endlich für ein chemisches Produkt angewendet, welches für sehr verschiedene Zwecke sich als vorteilhaft erweist, nämlich für das Ozon. Ozon ist bekanntlich eine Modifikation des Sauerstoffs, von der die Chemiker annehmen, daß sie darin besteht, daß in einem Ozonmolekül 3 Atome Sauerstoff miteinander verbunden sind, während in einem gewöhnlichen Sauerstoffmolekül nur zwei derselben in Verbindung treten. Das dritte Sauerstoffatom des Ozons aber ist verhältnismäßig schwach gebunden und trennt sich daher leicht von dem Molekül, so daß Ozon infolgedessen starke oxydierende Wirkung besitzt.

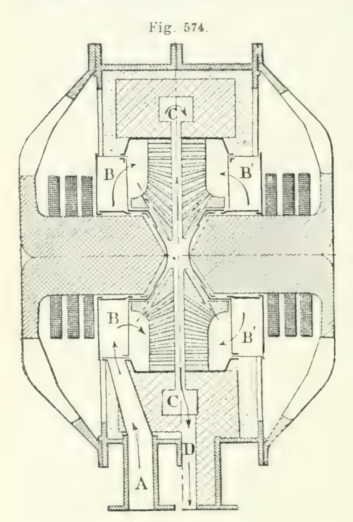
Fig. 573.

Immer wenn eine elektrische Entladung, sei es ein Funke oder eine Glimmentladung, durch die Luft oder durch Sauerstoff geht, bildet sich Ozon, welches an seinem eigentümlichen Geruch leicht erkannt wird. Man bemerkt den Ozongeruch immer, wenn man aus Influenzmaschinen Funken zieht, ebenso bei dem Arbeiten mit Induktionsapparaten. Sehr intensiv tritt der Ozongeruch insbesondere bei den Versuchen mit der Teslaschen Anordnung auf, von denen S. 278 f. die Rede war. Aber sogar auch in der Nähe von Radium wird die Luft ozonisiert. Einen Apparat, um Ozon in verhältnismäßig großen Mengen zu erzeugen, hat W. Siemens bereits 1857 unter dem Namen Ozonröhre konstruiert. Dieselbe besteht, wie Fig. 573 zeigt, aus zwei ineinander gesteckten und oben zusammengeschmolzenen Glasröhren, von denen die äußere ein Zufluß- und ein Abflußrohr für die Luft resp. den Sauerstoff hat. Die innere Glasröhre ist innen, die äußere außen mit Stanniol belegt, so daß man einen Kondensator hat, dessen Belegungen das Stanniol, dessen dielektrische Zwischenschicht die Glaswände und die Luft sind. Ladet man die Belegungen des Kondensators durch rasch wechselnde Ströme von hoher Spannung, so wird in der Luft Ozon erzeugt. Es hat sich nämlich gezeigt, daß das Ozon in größerer Menge erzeugt wird, wenn nur dunkle Entladungen durch die Luft hindurchgehen, als wenn wirklich Funken durch sie hindurchschlagen. Solche Ozonröhren haben sich sehr gut bewährt, so daß auch heute noch von Siemens & Halske die Ozonerzeugung durch derartige Röhren ausgeführt wird. Nur werden an die beiden Glasröhren nicht mehr die leitenden Belegungen aufgeklebt, sondern es wird vielmehr das innere Rohr mit Wasser gefüllt und das äußere in Wasser gestellt, so daß das Wasser selbst die Belegungen bildet. In anderen Fällen bilden Metallstäbe, die mit Glas umgeben sind, und Metallplatten die beiden Belegungen und die Zwischenschicht.

Das Ozon hat einige Anwendungen zunächst zur Sterilisierung von Trinkwasser, ferner in der *Bleicherei* zum Bleichen von Leinengarnen und Tuchen erfahren und hat sich auch als wichtig erwiesen zur Reinigung von Stoffen, namentlich von Stärkederivaten, so daß man Stärke, Dextrin, Kristallgummi in vorzüglicher Reinheit mittels Ozon herstellen kann. Andere Benutzungen des Ozons, wie zum künstlichen Altern von Holz, von Weinen und Spirituosen, zur Vernichtung der Reblaus, sind noch nicht, oder nur zum Teil, in die Praxis übergegangen. Dagegen wird das Ozon in Ozonventilatoren dazu benutzt, um die verdorbene Luft in Räumen wieder angemessen zu regenerieren.

Eine Aufgabe von ganz hervorragender Bedeutung hat die Elektrochemie in den letzten Jahren in Angriff genommen, nämlich die Herstellung von löslichen *Stickstoffverbindungen direkt aus der Luft*. Die Luft ist bekanntlich ein Gemenge von Sauerstoff und Stickstoff. Die löslichen Stickstoffverbindungen aber sind ein äußerst wichtiges Düngemittel für die Landwirtschaft und dieselben kommen in der Natur nur in Chile vor als Chilesalpeter. Die großen Salpeterlager von Chile aber gehen der Erschöpfung entgegen und so muß sich die Landwirtschaft und Industrie nach Ersatz für diese umsehen. In der Luft selbst ist der Stickstoff in unbeschränkten Mengen und kostenlos zur Verfügung, aber es handelt sich darum, solche Verbindungen des Stickstoffs und Sauerstoffs herzustellen, daß man diese leicht in lösliche Form bringen kann, wofür als Ausgangsprodukt am besten die Herstellung von Salpetersäure dient. Dazu eignet sich nun der elektrische Lichtbogen mit seiner hohen Temperatur. Der Sauerstoff und Stickstoff der Luft verbinden sich im elektrischen Lichtbogen zu Stickoxyd (NO). Aber wenn dieses Produkt in der hohen Temperatur des Lichtbogens bleibt, so zersetzt es sich auch rasch wieder. Es kommt also darauf an, die erhaltenen Stickstoffverbindungen möglichst rasch aus dem Bereich des Lichtbogens wieder zu entfernen, wobei sich aus dem Stickoxyd zum Teil Stickstoffdioxyd bildet. Diese Stickstoffverbindungen kann man dann verhältnismäßig leicht in Salpetersäure überführen. Dieses Verfahren ist nun in verschiedenfacher Weise technisch ausgebildet worden. Großen technischen und wirtschaftlichen Erfolg hat die Methode von *Birkeland* in Norwegen. Es kommt nämlich, damit die Produkte zu mäßigem Preis gewonnen werden, darauf an, daß die Kosten des elektrischen Stromes minimale seien und das ist der Fall, wenn große Wasserkräfte, wie in Norwegen und auch in Italien,

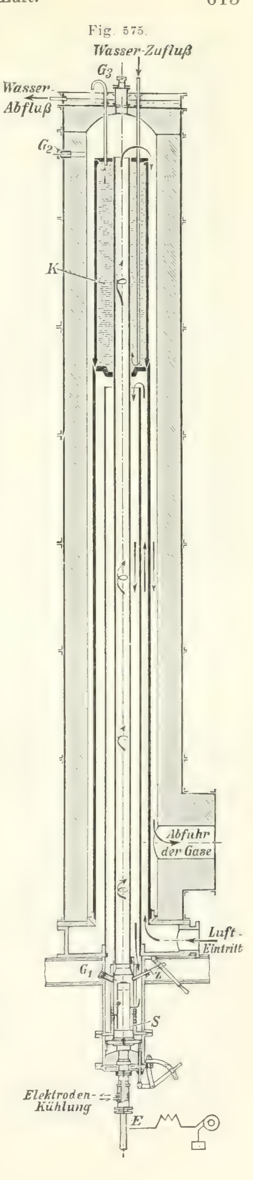
Fig. 574.



billig die Ströme erzeugen können. Der für dieses Verfahren benutzte Ofen von Birkeland ist in Fig. 574*) dargestellt. Der Lichtbogen wird dabei durch Wechselstrom von 5000 Volt Spannung zwischen zwei nahe beieinander stehenden Kupferelektroden (in der Figur sind es die horizontalen schraffierten Stücke) gebildet, aber sofort durch einen starken Magneten, dessen Pole senkrecht zu den Elektroden stehen, zu einer schmalen Scheibe von 1 bis 2 m Durchmesser ausgebreitet. Die Pole des Elektromagneten hat man sich senkrecht zur Papierebene, vorn und hinten, zu denken. Nach der Linken-Hand-Regel wird dann der Lichtbogen in vertikaler Richtung fortgeblasen, also, da er ein Wechselstromlichtbogen ist, nach oben und unten. In der Figur ist der Lichtbogen durch die gestreifte Schraffierung angedeutet. Über diese Lichtbogensonne streicht nun die Luft und sie wird zugleich mit dem sich ausbreitenden Lichtbogen mit einer enormen Geschwindigkeit, von etwa 100 m pro Sekunde, radial nach außen gerissen. Die Luft wird mit mäßiger Geschwindigkeit, etwa 1,5 m pro Sekunde, durch die Öffnung A und die Verteilungskanäle B dem Lichtbogen zugeführt und von diesem, bei teilweiser Umwandlung in die Stickstoffverbindungen, mit der angegebenen rasenden Geschwindigkeit an den Umfang geführt, wo sie durch den Sammelkanal C und den Ableitungskanal D nach außen abgesaugt wird. Hier wird zuerst ihre hohe Temperatur zum Heizen von Wasser verwendet, dann geht sie in Oxydationskammern und -türme über, wodurch die Stickstoffverbindungen in bekannter chemischer Weise zu Salpetersäure von 50 Proz. umgewandelt werden. Durch eine Kilowattstunde werden etwa 110 g Salpetersäure dabei erzeugt und dies genügt schon bei billigen Betriebskräften, um das Verfahren zu einem technisch wertvollen zu machen.

In der Erkenntnis, daß die künstliche Erzeugung von Stickstoffpräparaten eine Sache von außerordentlicher volkswirtschaftlicher Bedeutung ist, haben auch die großen chemi-

Fig. 575.



*) Diese Figur ist aus der Elektrotechnischen Zeitschrift 1906 mit Erlaubnis des Verlegers J. Springer in Berlin entnommen.

schen Fabriken Deutschlands, die Badische Anilin- und Sodafabrik, die Elberfelder Farbenfabriken und die A.G. für Anilinfabrikation gemeinsam große Werke in Norwegen anzulegen begonnen, um ebenfalls mittels des Lichtbogens die stickstoffhaltigen Gase zu gewinnen, die dann in lösliche Stickstoffverbindungen übergeführt werden. Über 400000 Pferdekräfte wollen sie in Norwegen allmählich für diese Fabrikation ausnutzen.

Der Ofen, den die Badische Anilinfabrik für diese Zwecke bereits ausprobiert hat und der von Dr. Schönherr konstruiert ist, erfüllt die Bedingung, die gebildeten nitrosen Gase aus dem Bereich des Lichtbogens rasch fortzuführen und abzukühlen in einer anderen Weise als der Birkelandsche. In Fig. 575 ist dieser Ofen skizziert. In dem innersten Eisenrohr wird ein langer Lichtbogen gebildet, der von der Elektrode E ausgeht. Die Luft, die rechts zugeführt wird, durchstreicht in der Richtung der Pfeile die konzentrischen Röhren erst aufwärts und dann abwärts, wobei sie schon vorgewärmt wird und tritt dann in das Rohr ein, in welchem der Lichtbogen brennt. Aber, das ist das Wesentliche bei dieser Konstruktion, sie strömt nun nicht einfach längs dem Lichtbogen aufwärts, sondern sie wird durch die Form der Eintrittsöffnungen gezwungen, um den Lichtbogen herumzuwirbeln, wodurch sie auch andererseits wieder bewirkt, daß der Lichtbogen nicht schon unten an dem Eisenrohr sein Ende findet, sondern sich 5 bis 7 m hoch in die Höhe zieht, bis er erst oben an einem gekühlten Rohr endet. Dabei wird der Wechselstromlichtbogen mit 4000 bis 5000 Volt betrieben. Die Zündung des Lichtbogens geschieht durch einen Zündhebel Z, der vorübergehend mit E in Verbindung gesetzt wird. Die heiß gewordene Luft, in der sich mehrere Prozent Stickoxyd gebildet haben, wird nun oben durch den Kühler K, der von Wasser durchflossen ist, rasch abgekühlt und strömt durch den äußeren Ring abwärts und aus dem Ofen heraus. Bei dieser Abkühlung bildet sich, wie gesagt, Stickstoffdioxyd. Beim Verlassen des Kühlers hat die Luft nur noch eine Temperatur von 1200°, beim Einströmen in den Abzugskanal nur noch von 850°. Bei diesen Temperaturen bleiben die erhaltenen Stickstoffverbindungen, ohne merkliche Zersetzung, bestehen. Die Überführung der stickstoffhaltigen Gase in Salpetersäure oder in lösliche Stickstoffverbindungen geschieht nach bekannten chemischen Verfahren.

So hat sich gezeigt, daß in diesem noch jungen Gebiet der Elektrochemie bereits eine sehr große Anzahl von technisch und kommerziell höchst wichtigen Errungenschaften gewonnen worden sind, und der Ausspruch Werner Siemens', der an den Anfang dieses Kapitels gestellt wurde, hat sich zum Teil schon erfüllt, und seine weiteren Voraussagungen für die Zukunft werden voraussichtlich sich auch als richtig erweisen.

12. Kapitel.

Die Galvanoplastik.

Die wunderbare Eigenschaft des elektrischen Stromes, daß er flüssige Leiter, Elektrolyte, bei seinem Durchgang in ihre Bestandteile zerlegt, und daß diese Bestandteile an den Elektroden frei auftreten, führte schon im Jahre 1837 Jacobi dazu, darauf eine Methode zum Überziehen von Körpern mit Metallen zu gründen. Dadurch gab er den Anstoß zu der Galvanoplastik, der Kunst, auf galvanischem Wege Metallniederschläge auf den Oberflächen von Körpern hervorzubringen, und seit dieser Zeit hat sich die Galvanoplastik zu einem bedeutenden Industriezweig ausgebildet und immer neue Aufgaben in ihre Domäne gezogen.

Jede Lösung eines Metallsalzes, z. B. eine Kupfervitriollösung, wird durch einen elektrischen Strom, wie wir wissen (S. 129 f.), elektrolysiert, und es scheidet sich das Metall an der negativen Elektrode ab, der übrige Bestandteil, der die Säure enthält, an der positiven Elektrode. Besteht die positive Elektrode aus demselben Metall, welches in dem gelösten Salz enthalten ist, so wird für jedes Äquivalent des Metalls, das sich an der negativen Elektrode abscheidet, ein Äquivalent desselben Metalls von der positiven Elektrode aufgelöst, die Flüssigkeit bleibt also immer gleich konzentriert, und es findet nur an der positiven Elektrode eine Auflösung des Metalls, an der negativen ein Niederschlagen desselben Metalls statt.

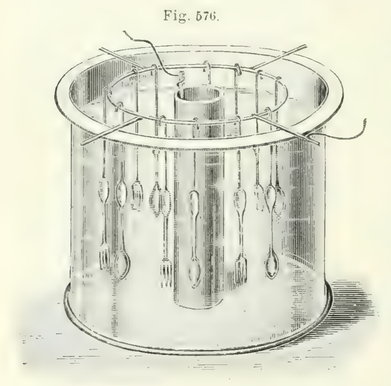
Auf diese Weise kann man also die negative Elektrode mit einer Schicht eines Metalls überziehen, und je nach dem Metallsalz, das man anwendet, kann man Gegenstände verkupfern, vernickeln, vergolden, verzinnen, verplatinieren, verstählen. Jedoch eignet sich nicht jedes Metallsalz gleich gut, um solche galvanoplastische Niederschläge zu liefern, es haben sich im Gegenteil durch die Erfahrung für die verschiedenen Metallniederschläge bestimmte Salze und bestimmte Konzentrationen der Lösungen als besonders zweckmäßig erwiesen. Im allgemeinen nämlich sind es nicht die direkten Produkte der Elektrolyse, welche schöne Metallniederschläge ergeben, sondern vielmehr die durch sekundäre Prozesse erzeugten. Es werden daher gewöhnlich Doppelsalze angewendet, aus welchen das gewünschte Metall nicht durch den Strom direkt ausgeschieden wird, sondern erst dadurch, daß das wirkliche Kation es aus seiner Verbindung chemisch verdrängt. Doch ist dabei auch immer die Konzentration der Flüssigkeit, aus welcher das Metall niedergeschlagen werden soll, des Bades, von wesentlichem Einfluß auf die Schönheit des Niederschlags, und es haben darin die einzelnen Fabriken ihre besonderen Geheimnisse. Ebenso ist auch bei der Galvanoplastik, wie bei der eigentlichen Elektrochemie, die passende

Stromdichte (S. 602) für jeden Prozeß besonders zu bestimmen. Zu große Stromdichten machen häufig die Metallniederschläge rauh und brüchig, zu kleine machen sie oft schwammig. Man muß also zur richtigen Führung jedes galvanoplastischen Prozesses die Stromstärke im Verhältnis zur Oberfläche der Kathode richtig wählen.

Zwei Aufgaben lassen sich sofort bei der Galvanoplastik unterscheiden. Die eine Aufgabe besteht darin, gewisse Gegenstände mit einem dünneren oder dickeren Überzug eines Metalles, z. B. Gold, zu versehen, so daß der Überzug auf ihnen haften bleibt. Das ist die Aufgabe der sogenannten Galvanostegie. Die zweite Aufgabe ist die, Gegenstände, z. B. Gipsmedaillen, mit einer dickeren Schicht eines Metalls zu überziehen, so daß man diese Schicht von ihnen abnehmen kann und dadurch einen Abdruck des ursprünglichen Gegenstandes erhält. Dies ist die Aufgabe der Galvanoplastik im eigentlichen Sinne. Beide Aufgaben sind nur durch ihre Benutzung verschieden, ihre Lösung auf galvanischem Wege ist dieselbe.

Wenn ein leitender Körper, also gewöhnlich ein Metall, mit einem galvanoplastischen Überzug versehen werden soll, der auf ihm haften soll, so ist es vor allen Dingen nötig, die Oberfläche des Metalles ganz von allen Verunreinigungen zu befreien, oder, wie man sagt, zu dekapieren. Diese Dekapierung kann bei manchen Metallen dadurch geschehen, daß man sie in Säuren eintaucht, also auf chemischem Wege, bei anderen muß man auf mechanischem Wege durch Bürsten und Reiben dieselbe zu bewerkstelligen suchen.

Fig. 576.

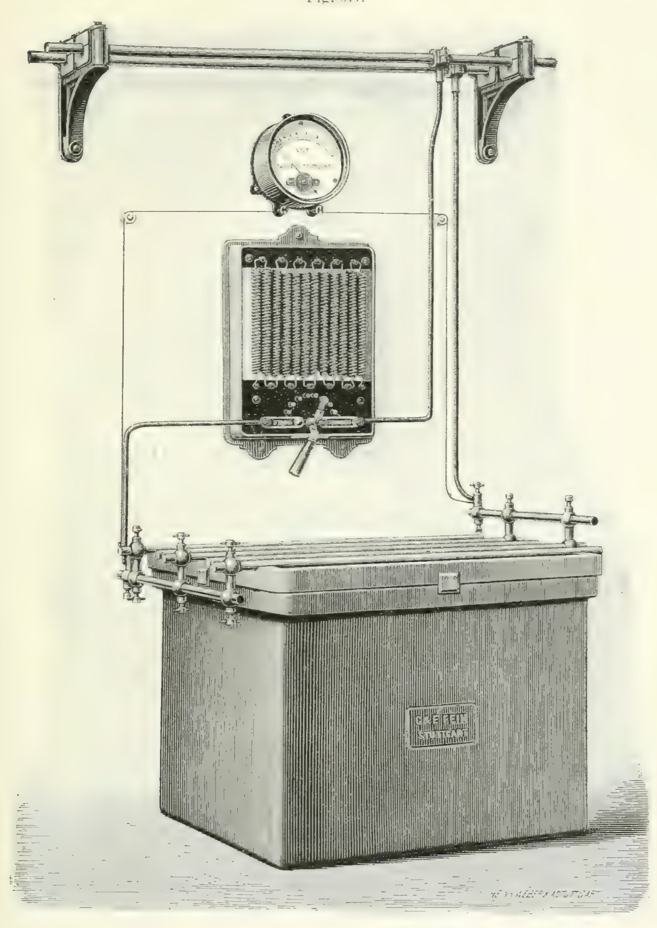


Es werden dann die zu überziehenden Gegenstände, also z. B. Löffel und Messer und Gabeln, alle zusammen in das Bad getaucht, z. B. in ein Silberbad, und alle parallel miteinander verbunden, also etwa alle an einen Metallstab leitend angehängt, der mit der negativen Elektrode der Stromquelle verbunden ist. Ein solches Bad zeigt z. B. Fig. 576. Oben auf dem hohen Glasgefäß befindet sich in der Mitte ein Ring von Messing, der durch vier Stäbchen auf dem Rand des Gefäßes aufsitzt. An dem Ring hängen alle zu versilbernden Gegenstände, und sie sind durch den Ring alle mit der negativen Elektrode der Batterie verbunden. Als positive Elektrode steht in diesem Falle ein zylinderförmiges Silberblech in der Mitte des Bades, damit alle Gegenstände möglichst gleichmäßig stark versilbert werden.

Die als negative Elektrode dienenden Gegenstände überziehen sich dann mit einer Schicht von Silber, die sich ganz genau der Form der Gegenstände anschließt und um so dicker wird, je länger man den Strom durch-

fließen läßt. Die Gleichmäßigkeit des Überzugs wird noch dadurch befördert, daß man die Gegenstände von Zeit zu Zeit umkehrt.

Fig. 577.



Größere Bäder werden aus Kästen hergestellt, die entweder aus emailliertem Gußeisen oder Steinzeug, oder bei sauren Bädern aus Holz gemacht werden, welches innen mit Blei ausgeschlagen oder mit Pech bestrichen wird.

Ein solches größeres Bad ist in Fig. 577 abgebildet. Es besteht aus einer Steinzeugwanne, auf deren oberem Rand fünf voneinander isolierte Messingstäbe liegen. Der erste, dritte und fünfte Stab sind links, der zweite und vierte rechts miteinander verbunden und die linke Seite wird mit dem positiven Pol der Batterie, die rechte mit dem negativen in Verbindung gesetzt. An die mit dem negativen Pol verbundenen Stäbe werden die galvanoplastisch zu überziehenden, etwa zu verkupfernden Gegenstände, an die anderen in diesem Fall Kupferbleche oder Bleche aus dem gewünschten anderen Metall angehängt. Da die zu überziehenden Gegenstände mitten zwischen den Metallplatten hängen, so werden sie gleichmäßig überzogen. Auch hier wird die Gleichmäßigkeit wieder durch zeitweiliges Umhängen befördert. Da man ferner auch in diesem Gebiet das Hauptaugenmerk auf quantitative Messungen von Stromstärke und Spannung legt, um immer genau unter den besten Bedingungen zu arbeiten, so schaltet man parallel zu den Enden des Bades ein Voltmeter ein und in die Leitung zum Bade einen Regulierwiderstand. Man sieht in der Figur oben die zwei Hauptleitungen von der Batterie oder Dynamomaschine. An diese ist das Bad angeschlossen unter Zwischenschaltung eines Regulierwiderstandes. Das Voltmeter mißt die Spannung des Bades.

Die Vorschriften für die einzelnen Metallbäder, die öffentlich bekannt sind, sind nicht immer diejenigen, nach denen die Fabriken auch wirklich arbeiten. Vielmehr haben diese zum Teil geheime Verfahren, die sich allmählich als vorteilhaft herausgestellt haben. Indessen sollen hier einige Zusammensetzungen von Bädern angeführt werden, nach denen man sicher arbeiten kann.

Das Bad zur Versilberung besteht aus einer Lösung von Cyansilberkalium, welche man in der für die Versilberung passenden Zusammensetzung erhält, wenn man in 10 l Wasser 120 g reines Cyankalium auflöst und dazu 460 g Kaliumsilbercyanid gibt, welches sich ebenfalls auflöst. Die passende Stromdichte für guten Silberniederschlag ist 0,5 Ampere pro Quadratdezimeter.

Zum Verkupfern nimmt man gewöhnlich eine gesättigte Lösung von schwefelsaurem Kupfer (Kupfervitriol) oder eine Lösung von Cyankupferkalium, letztere namentlich bei der Verkupferung von Eisen- und Zinkgegenständen. Die letztere enthält auf 10 l Wasser 170 g Soda, 250 g doppeltschwefelsaures Natron, 200 g essigsaures Kupfer (kristallisiert) und 200 g Cyankalium. Die passende Stromdichte ist dabei etwa 0,4 Ampere pro Quadratdezimeter, während sie bei dem Kupfervitriolbad sehr viel größer sein kann, bis ca. 3 Ampere pro Quadratdezimeter.

Zum Vergolden benutzt man am vorteilhaftesten eine Lösung von Cyangoldkalium. Es wird als passendes Goldbad empfohlen eine Lösung, welche in 10 l Wasser 10 g Cyankali, 500 g phosphorsaures Natron, 15 g doppeltschwefelsaures Natron und 15 g Chlorgold enthält. Das Bad wird bei 50^0 angewendet und pro Quadratdezimeter 0,2 Ampere benutzt. Besondere Formen der Vergoldung sind die sogenannte grüne und rote Vergoldung, bei welcher der Goldüberzug nicht aus reinem Gold besteht, sondern aus Gold, welches mit Silber, resp. Kupfer versetzt ist. Es ist sehr schwierig, die richtige Zusammensetzung des Bades zu finden, aus welchem grünes oder rotes Gold von gewünschter

Nüance abgeschieden wird. Man läßt deshalb den Strom selbst die richtige Zusammensetzung bereiten. In ein gewöhnliches (braunes) Goldbad, in welchem das zu überziehende Metall als negative Elektrode hängt, taucht man als positive Elektrode eine reine Silberplatte. Diese löst sich durch den Strom auf, und dadurch ändert sich die Zusammensetzung des Bades allmählich und der Niederschlag auf dem negativen Metall bekommt allmählich die grüne Farbe. Sobald die gewünschte Nüance da ist, wird der Strom unterbrochen und nun als positive Elektrode eine Platte aus grünem (silberhaltigen) Gold hineingehängt, welche dann den Prozeß bis zu Ende durchführt. Dasselbe Verfahren wird bei der roten Vergoldung mit einer Kupferplatte statt der Silberplatte angewendet.

Zum Vernickeln nimmt man ein Bad, welches pro Liter 70 g schwefelsaures Nickeloxydulammoniak enthält, also mit dem Nickelsalz gesättigt ist, ferner 25 g Ammoniumsulfat und 5 g Zitronensäure enthält. Die Stromdichte ist 0,5—0,7 Ampere pro Quadratdezimeter. Nickelüberzüge sind namentlich bei Eisengegenständen sehr wertvoll, weil sie das Rosten hindern. Auch Messinggegenstände werden jetzt sehr häufig vernickelt. Zu einer haltbaren Vernicklung gehört unbedingt vollständige Reinheit der zu behandelnden Flächen. Zum Vernickeln muß man, wegen der hohen Polarisation, eine größere Spannung als für die anderen Bäder anwenden, nämlich so, daß man an jedem Nickelbad 4 Volt Spannung erhält.

Zum Verstählen benutzt man ein Bad, welches pro Liter 150 g Eisenvitriol und 125 g Magnesiumsulfat, in Wasser gelöst, enthält. In die Flüssigkeit werden Säckchen mit Magnesia alba gehängt. Die Stromdichte beträgt nur 0,1 Ampere pro Quadratdezimeter. Zum Verstählen von Druckplatten, von denen weiter unten die Rede sein wird, nimmt man Bäder aus säurefreier Eisenchlorürlösung (100 g wasserfreies Eisenchlorür, 100 g Chlorammonium auf 1 Liter Wasser).

Während man früher für diese galvanoplastischen Arbeiten stets sich der galvanischen Elemente bediente und infolgedessen bei großen Fabriken eine sehr große Anzahl derselben benutzen mußte, ist seit der Einführung der Dynamomaschine auch in diesem Zweig der Elektrotechnik ein Umschwung eingetreten. Man kann natürlich jede Dynamomaschine, welche gleichgerichtete Ströme liefert, zur Galvanoplastik benutzen. Die galvanoplastischen Bäder sind jedoch immer so große, ausgedehnte Flüssigkeitsmengen, daß ihr galvanischer Widerstand fast verschwindend ist. Es ist also für galvanoplastische Zwecke zwar eine Maschine nötig, welche einen starken Strom liefert, aber sie braucht nur geringe elektromotorische Kraft zu haben. Es werden daher die Maschinen für galvanoplastische Zwecke mit sehr geringem inneren Widerstand gebaut und zwar wendet man immer Nebenschlußmaschinen an. Es kommt ja für die Galvanoplastik wesentlich darauf an, daß stets derjenige Pol, welcher mit den zu überziehenden Gegenständen verbunden ist, der negative Pol bleibt, daß nicht etwa die Elektromagnete der Dynamomaschine ihre Polarität während des Betriebes umkehren und so die Gegenstände, statt z. B. vernickelt zu werden, entnickelt werden. Ein solches Umkehren kann aber bei Hauptstrommaschinen leicht eintreten, wenn Anker, Magnete und Bad hintereinandergeschaltet werden. Bei der

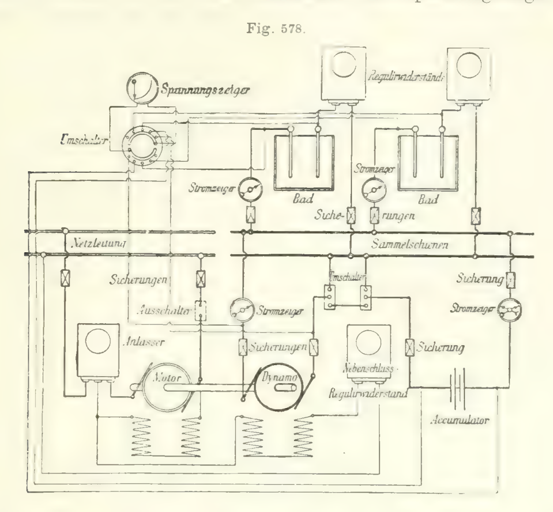
Elektrolyse entsteht ja immer Polarisation und also auch ein Polarisationsstrom, welcher dem Maschinenstrom entgegenwirkt (s. S. 149). Wenn also z. B. während des Betriebes die Geschwindigkeit der Maschine plötzlich abnimmt, etwa durch eine momentane Störung des Motors, so überwiegt der Polarisationsstrom, es fließt also ein Strom in entgegengesetzter Richtung durch die Maschine, und die Pole der Elektromagnete werden umgekehrt. Kommt die Dynamomaschine wieder in richtigen Gang, so bleiben doch die Pole der Elektromagnete umgekehrt, weil eine Dynamomaschine ja nur den vorhandenen Magnetismus ihrer Eisenteile verstärkt. Der Strom der Maschine hat also nun die entgegengesetzte Richtung wie früher; der vorher negative Pol wird jetzt positiver Pol. Alle die Niederschläge auf den Gegenständen im Bade werden also nun wieder aufgelöst.

Auf sehr einfache Weise wird diese Gefahr durch die Nebenschaltung der Elektromagnete beseitigt, wie wir bereits S. 438 gesehen haben, wo erwähnt wurde, daß zum Laden von Akkumulatoren ebenfalls Nebenschlußdynamos und aus demselben Grunde gewählt werden.

Will man in Orten, in welchen durch elektrische Zentralen Strom verteilt wird, eine galvanoplastische Einrichtung betreiben, so hat man gewöhnlich mit der Schwierigkeit zu rechnen, daß die Spannung des Stromes, wie ihn die Zentralen liefern, eine sehr hohe ist, 100 bis 200 Volt, während man zum Betrieb der Bäder nur Spannungen von 3 bis 6 Volt braucht. In diesem Falle kann man sich derart helfen, daß man von dem Strom der Zentrale zunächst einen Elektromotor treiben läßt und daß man von diesem erst eine passende Dynamomaschine, die Ströme von wenigen Volt Spannung, aber hoher Stromstärke zu liefern imstande ist, antreibt. Man benutzt also dann einen Gleichstromumformer (S. 455), welcher die hohe Spannung in niedrige verwandelt. Dabei schaltet man auch gewöhnlich noch parallel zur Dynamomaschine einige Akkumulatoren, damit diese im Falle, daß keine Bedienung für den Motor vorhanden ist, die Stromlieferung übernehmen. Eine Schaltung für diesen häufig vorkommenden Fall, bei dem zwei parallel geschaltete Bäder von der Netzleitung der Zentrale aus indirekt mit Strom versorgt werden sollen, zeigt Fig. 578, eine Schaltung, die kompliziert aussieht, aber leicht zu verstehen ist. Der Strom von der Zentrale kommt in die beiden Leitungen links, die als Netzleitung bezeichnet sind. Von der einen Schiene dieser Leitung geht der Strom durch eine Sicherung und einen Anlasser (Widerstand) zu dem Elektromotor, der als Nebenschlußmotor gezeichnet ist, und geht von dessen rechter Bürste durch einen Ausschalter und eine Sicherung zur anderen Netzschiene. Der Motor kommt in Rotation und treibt die mit ihm direkt gekuppelte oder durch Riemen mit ihm verbundene Dynamomaschine, die ebenfalls eine Nebenschlußmaschine ist. Der Nebenschluß derselben (die Magnete) wird durch einen Regulierwiderstand direkt von der Netzleitung gespeist. Von den Bürsten dieser Dynamo gehen die Leitungen durch Sicherungen und Stromzeiger zu den zwei Schienen rechts, die als Sammelschienen bezeichnet sind. Es kann aber auch durch den Umschalter der Strom dieser Dynamo erst in den Akkumulator geleitet werden und dann zur Schiene, oder es kann der Strom vom Akkumulator direkt in die

Schienen geleitet werden. An die Sammelschienen, die also, wie gesagt, wenige Volt Spannung haben, sind nun die beiden Bäder oben parallel geschaltet und jedes ist mit einem Regulierwiderstand versehen. Durch besondere Drähte, die zu dem Umschalter und Spannungszeiger (Volt-

Fig. 578.



meter) links oben führen, kann man die Spannung jedes einzelnen Teiles, der Dynamomaschine oder des Akkumulators oder jedes der beiden Bäder messen.

Mit starken Strömen ist es nun möglich, in kurzer Zeit beliebig große Mengen von Gegenständen mit Niederschlägen von Metallen zu versehen, und diese Niederschläge können mit einiger Sorgfalt so gleichmäßig gemacht werden, daß sie den feinsten Konturen des Gegenstandes sich anschmiegen. Wenn der galvanische Niederschlag, wie es beim Vergolden, Versilbern, Vernickeln fast stets verlangt wird, fest auf dem Gegenstand haften soll, so muß dessen Oberfläche, wie schon erwähnt, vollständig rein sein, sie muß dekapiert werden. Die geringste Spur von Fett auf einem Körper läßt den galvanischen Niederschlag nicht fest auf ihm haften, sondern man kann ihn dann leicht ablösen. Dies ist namentlich beim Vernickeln zu beobachten. Gut haftende Nickelüberzüge können nur auf absolut reinen Flächen niedergeschlagen werden. Die Gegenstände, welche galvanisch überzogen sein sollen, müssen stets leitend sein, da sie ja als negative Elektroden in die Flüssigkeit tauchen müssen. Das Einfachste ist daher, auf Metallen galvanische Niederschläge hervorzubringen. Aber auch nicht leitende Körper kann man galvanoplastisch überziehen, wenn man bloß ihre Oberfläche leitend macht, wenn man sie, wie die galvanoplastische Technik es nennt, metallisiert. Das einfachste und gewöhnlich angewendete Mittel dazu ist das, die Oberfläche

des betreffenden Körpers mit ganz feinem Graphitpulver einzureiben. Der Graphit ist ein Leiter der Elektrizität, er ist in äußerst feinen Zustand zu bringen und haftet leicht an Körpern, namentlich wenn sie nicht ganz eben und glatt sind. So kann man Gipsmedaillen oder -figuren, ebenso Figuren aus Holz, Alabaster, Marmor einfach durch Bestreichen mit Graphitpulver an der Oberfläche leitend machen. In anderen Fällen, wo der Graphit nicht haftet, z. B. bei Glas, Porzellan, Elfenbein und anderen, muß man erst den Gegenstand mit einer ganz dünnen Firnisschicht überziehen und, wenn diese beinahe trocken geworden ist, das Graphitpulver aufstreichen. Will man den galvanoplastischen Überzug von dem Gegenstand nachher leicht entfernen können, so muß man die Bürste, mit welcher man den Graphit aufstreicht, etwas mit Talg einfetten.

In manchen Fällen, namentlich bei sehr zarten Objekten, Früchten, Blumen u. s. w., läßt sich aber dieses Metallisieren mit Graphit nicht anwenden. Man kann dann aber auf chemischem Wege den Gegenstand mit einer ganz feinen leitenden Schicht versehen. Man braucht nur das Objekt mit einer Lösung von salpetersaurem Silber einzustreichen und kann dann durch Reduktion das Silber auf dem Objekt in einer sehr feinen Schicht niederschlagen. Das salpetersaure Silber löst sich in Wasser leicht, in warmem Alkohol zwar schwer, aber doch etwas. Mit dieser Lösung überstreicht man dann die Objekte (Blumen und Früchte z. B. mit einer alkoholischen Lösung), und wenn man sie dann dem Sonnenlicht aussetzt, so scheidet sich das Silber aus der Lösung in Form eines ganz feinen, schwarzen Pulvers auf der Oberfläche ab und macht diese nun leitend genug, um galvanoplastisch überzogen werden zu können.

Auf diese Weise kann man auf jedem beliebigen Körper einen galvanischen Überzug hervorbringen. Will man diesen Überzug nachher auch leicht wieder von dem Objekt trennen, will man Abdrücke des Gegenstandes haben, so muß man bewirken, daß der Überzug von vornherein nicht fest an dem Gegenstand haftet. Zu dem Zweck ist es nun notwendig, den Gegenstand vor dem Einhängen in das Bad an seiner Oberfläche einzufetten. Meistenteils und am leichtesten werden diese Abdrücke in Kupfer gemacht. Der leitende oder metallisierte Gegenstand wird, etwas gefettet, als negative Elektrode in eine Lösung von schwefelsaurem Kupfer gebracht, und wenn die niedergeschlagene Schicht eine gewisse Dicke erreicht hat, ist es leicht, sie einfach abzunehmen. So macht man von Kunstwerken, von Gipsfiguren, von Medaillen, Münzen galvanische Kupferabdrücke. Ja man kann sogar von Photographieen galvanische Abdrücke in Kupfer erhalten. Eine Daguerrotypplatte wird mit einer sehr verdünnten Lösung von Cyankali übergossen, abgewaschen und dann in das Bad gehängt. Wenn ein schwacher Strom 5 bis 8 Stunden hindurchgeflossen ist, so ist auf der Platte eine Kupferschicht vorhanden, welche sich leicht mit einem Messer ablösen läßt und welche die Photographie bis in die feinsten Details wiedergibt.

Galvanische Abformungen werden jetzt fast allein zur Reproduktion von Stahlstichen und Holzschnitten angewendet. Von einem Holzschnitt z. B. lassen sich nicht ohne Schaden sehr viele Abdrücke machen. Man verfertigt daher von einem solchen Holzschnitt, den man durch Graphit metallisiert, beliebig viele galvanische Abformungen, Klischees

oder Galvanos genannt, und macht von jedem solchen Klischee nur so viele Abdrücke, als man scharf erhalten kann. Dabei ist eine Stromdichte von etwa 1 Ampere pro Quadratdezimeter anzuwenden. Dasselbe Verfahren wendet man oft bei Drucken, bei Schriftsätzen an, von welchen man, nachdem sie gesetzt sind, erst galvanische Klischees anfertigt, die man dann nur so oft benutzt, als sie scharfe Abdrücke geben. Um Kupferplatten, die durch viele Abdrücke sehr leiden, beliebig oft reproduzieren zu können, macht man auch galvanoplastisch sogenannte Hochplatten von ihnen (in denen die Zeichnung erhaben ist) und kann dann von den Hochplatten beliebig viele Klischees abnehmen. Oft macht man auch die Originalkupferplatte des Stichs dadurch widerstandsfähig, daß man sie galvanoplastisch mit einer dünnen Schicht Eisen überzieht, verstählt oder noch besser vernickelt. Dazu dienen Eisenchlorürbäder für die Verstählung und Bäder aus schwefelsaurem Nickeloxydul für die Vernickelung. Eine solche verstählte oder vernickelte Kupferstichplatte erlaubt eine sehr große Menge von Abdrücken. Man hat von verstählten Platten bis 15 000, von vernickelten bis 40 000 Abzüge in tadelloser Form erhalten können.

Während auf der negativen Elektrode das Metall aus der Lösung niedergeschlagen wird, wird die positive Elektrode aufgelöst. Auch diese Auflösung der positiven Elektrode läßt sich technisch verwerten, nämlich zum Gravieren der Metalle. Wenn man nämlich einzelne Teile der positiven Elektrode mit einer isolierenden Substanz, z. B. mit Lack oder Wachs, bedeckt, so werden diese Teile während des Stromdurchgangs nicht aufgelöst. Von den übrigen nicht bedeckten Teilen wird das Metall allmählich fortgenommen, sie werden vertieft, während die bedeckten Teile in der ursprünglichen Höhe bleiben. Man kann also das Metall der positiven Elektrode z. B. ganz mit Wachs überziehen und nur eine Zeichnung in das Wachs kratzen, so daß dort das Metall frei liegt, dann ist nach dem Durchgang des Stromes diese Zeichnung vertieft in dem Metall. Oder man kann auch das Muster ganz mit Wachs bedeckt halten und nur die übrige Fläche der Elektrode frei lassen, dann wird nach Durchgang des Stromes das Muster erhaben auf der Elektrode erscheinen. Die vertieften Muster kann man dann, nachdem sie dekapiert sind, galvanisch mit einem anderen Metall, Gold, Silber, Kupfer u. s. w., ausfüllen, so daß man eine vollständige Metallinkrustation erhält. Auf diese Weise werden häufig kunstgewerbliche Gegenstände hergestellt und oft auch Antiquitäten nachgemacht, wozu sich die Elektrizität eben auch hergeben muß.

---

13. Kapitel.

Die Telegraphie.

Zwei Eigenschaften des elektrischen Stromes sind es, welche ihn zur Übertragung von Nachrichten auf weite Entfernungen besonders geeignet machen, nämlich erstens die große Schnelligkeit, mit der sich der elektrische Strom auf Leitern fortpflanzt, und zweitens der Umstand, daß er auf den Leitern bleibt, daß man ihm also mit Leichtigkeit und Sicherheit seinen Weg vorschreiben kann. Die Geschwindigkeit, mit der die Elektrizität auf Leitern sich fortpflanzt, ist gleich der Lichtgeschwindigkeit, so daß alle Entfernungen, die wir auf der Erde haben, fast momentan von der Elektrizität durchflossen werden. Da nun weiter der elektrische Strom immer den Leitern entlang fließt, so kann man, da die Luft ein ausgezeichneter Isolator ist, den Strom auf Drähten, die in der Luft geführt sind, beliebig weit und in beliebiger Richtung fortleiten. Das ist ein großer Vorzug, den der elektrische Strom vor dem Licht hat, welches sonst allein an Geschwindigkeit mit ihm konkurrieren kann. Von einer Lichtquelle in der Luft breitet sich das Licht nach allen Richtungen hin aus, man kann ihm keinen bestimmten Weg vorschreiben. Und nun übt die Elektrizität so verschiedenartige Wirkungen aus, läßt sie sich in so vielfacher Weise umwandeln, daß es leicht ist, an entfernten Stellen von einem Punkt aus durch sie gewisse Wirkungen hervorzubringen und dadurch verabredete Zeichen zu geben.

Jedoch die ersten Bemühungen, die auf das telegraphische Senden von Nachrichten gerichtet wurden, waren sehr unzweckmäßig, weil man für jeden Buchstaben, den man telegraphieren wollte, einen eigenen Draht anwenden wollte, so daß Napoleon I., als ihm der Plan eines derartigen Telegraphen vorgelegt wurde, ihn spöttisch als „idée germanique" abwies. Erst seitdem man einsah, daß alle unsere Buchstaben durch zwei Zeichen sich bequem ausdrücken lassen, konnte die Telegraphie dem praktischen Bedürfnis im großen entsprechen.

Im Laufe der Entwicklung des telegraphischen Verkehrs hat man die verschiedenen Wirkungen des elektrischen Stroms diesem Zwecke nutzbar zu machen versucht. Doch sind alle die verschiedenen Systeme in der Hauptsache von denjenigen Apparaten abgelöst worden, welche elektromagnetische Wirkungen, nämlich die Anziehungen eines Elektromagneten auf seinen Anker, benutzen. Diese Wirkung des Stromes ist einerseits bei den Schreibtelegraphen angewendet, welche bleibende Zeichen beim Telegraphieren geben, bei denen jedoch eine besondere Schrift nötig ist, welche erlernt und geübt werden muß, so daß zum Telegraphieren und zum Lesen der Depesche eine besondere Vorbildung gehört. Und sie ist andererseits benutzt bei den Typendrucktelegraphen,

welche die telegraphierten Worte direkt in gewöhnlicher Druckschrift aufzeichnen, welche also bleibende und sofort lesbare Zeichen geben.

Diese zwei Arten von Telegraphenapparaten sind diejenigen, welche in der weitaus größten Mehrzahl aller Fälle in allen Kulturländern zum Telegraphieren dienen. Indes werden für besondere Zwecke, nämlich einerseits für die Kabeltelegraphie, andererseits für die Schnelltelegraphie, auch noch andere Wirkungen des elektrischen Stromes benutzt.

Bei allen Telegrapheneinrichtungen, bei denen zwei Stationen miteinander verbunden sind, muß auf jeder Station eine Batterie und ein Apparat vorhanden sein, um die Depesche absenden zu können, also um Zeichen geben zu können; ferner muß ein Apparat vorhanden sein, welcher die Depeschen, die von der anderen Station kommen, aufnimmt. Endlich muß eine Drahtleitung zwischen den beiden Stationen vorhanden sein, die eine bestimmte zweckmäßige Einrichtung haben muß. Ferner gehören zu jeder Station noch Apparate, welche aufmerksam machen, daß depeschiert werden soll, elektrische Klingeln oder andere Signalapparate, ferner Galvanometer, welche anzeigen, daß der benutzte Strom die richtige Stärke hat, und endlich Blitzschutzvorrichtungen, welche die Apparate vor Blitzbeschädigungen schützen.

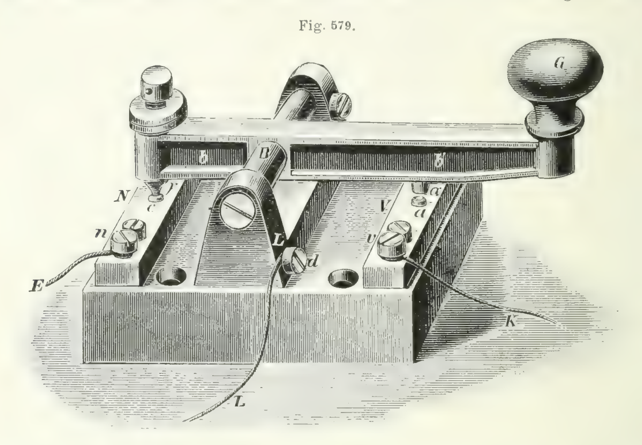
Nach vielen mehr oder weniger unpraktischen Vorschlägen waren es zum ersten Male zwei deutsche Professoren, Gauß und Weber, welche in Göttingen 1833 telegraphisch miteinander verkehrten, einer von den Beweisen, daß die so häufig als unpraktisch verlachten Professoren doch manchmal recht praktische Dinge erfinden können. Sie verbanden das magnetische Observatorium und das physikalische Kabinett miteinander durch zwei Drähte, die zusammen etwa 3000 m lang waren, und konnten sich auf dieser Leitung elektromagnetisch dadurch verständigen, daß der eine einen Magneten in eine Rolle hineinsteckte oder aus ihr herauszog, welche mit der Drahtleitung in Verbindung war. Dadurch entstanden jedesmal kurzdauernde Induktionsströme nach der einen und der anderen Richtung, und auf der Empfangsstation wurde durch diese Ströme ein Magnetstab, der in einer Drahtrolle hing, nach der einen oder anderen Seite abgelenkt. Durch zweckmäßige Kombination der Ausschläge nach rechts oder links konnten sie so eine beliebige Menge Zeichen bilden. Durch Gauß angeregt, vervollkommnete dann Steinheil in München diesen elektromagnetischen Nadeltelegraphen, indem er die Manipulationen bei dem Geben der Zeichen sehr vereinfachte. Bei seinen Versuchen zwischen Nürnberg und Fürth kam nun Steinheil zufällig auf die Beobachtung, daß es gar nicht nötig sei, die beiden Stationen durch zwei Drähte, einen zur Hin- und einen zur Rückleitung, miteinander zu verbinden, sondern daß man die Erde selbst als Rückleitung benutzen könne. Man braucht von jeder Station nur eine Platte in die Erde zu führen und sie dort einzugraben, dann fließt der Strom zwischen den beiden Stationen durch die Erde hindurch, welche ja ebenfalls ein Leiter der Elektrizität ist. Es ist dann also nur ein einziger Draht zwischen beiden Stationen nötig. Die Anschauung, wie sie Steinheil von der Erdleitung hatte, daß die Erde eben direkt den Strom zurückleitet, ist sicher unrichtig. Die Erde ist vielmehr gewissermaßen ein Reservoir, in welches alle Elektrizität hineinfließt. Aber die von Steinheil entdeckte Tatsache

bleibt deswegen ungeändert, und durch sie konnte die Telegraphie sich so rasch zu einem allgemein gebrauchten Verkehrsmittel erheben, weil durch die Ersparung der einen Hälfte der Drahtleitung natürlich auch die Kosten erheblich geringer wurden.

Die vielen verschiedenen Formen der Telegraphen sind in neuerer Zeit fast alle verdrängt durch den Morseschen Schreibtelegraphen und den Hughesschen Typendrucktelegraphen, mit denen wir uns daher vorzugsweise beschäftigen werden.

Bei dem Morsesystem werden die Zeichen durch ein kürzeres oder längeres Schließen eines Stromes gegeben, der durch die beiden verbundenen Stationen hindurchfließt. Dieser Strom bewirkt, daß an der Empfangsstation ein Elektromagnet erregt wird und seinen Anker anzieht. An dem Anker ist ein Stift befestigt, der auf

Fig. 579.



einen an ihm sich vorbei bewegenden Papierstreifen Zeichen, nämlich Punkte oder Striche, eindrückt oder aufschreibt. Es muß also an der Aufgabestation eine galvanische Batterie vorhanden sein, deren Strom durch die Drahtleitung in die entfernte Station und um deren Elektromagneten herum fließt, und es muß ferner auf der Aufgabestation ein Apparat vorhanden sein, durch welchen der Strom dieser Batterie beliebig geöffnet und geschlossen werden kann. Ein solcher Apparat ist natürlich ganz leicht zu bilden. Man bezeichnet ihn als Taster oder Morseschlüssel und er ist in Fig. 579 abgebildet. Ein metallischer Hebel b b' kann sich um seine Achse B drehen und kann daher durch den Kopf G niedergedrückt oder losgelassen werden. Ist er losgelassen, wie in der Figur, so ruht er mit seinem Ende γ auf einem Metallknopfe c, der auf einer Metallschiene N sitzt, während sein anderes Ende α frei in der Luft sich befindet. Wird er dagegen heruntergedrückt, so berührt der Stift α den Knopf a, der ebenfalls auf einer Metallschiene V sitzt, und γ ist von c getrennt. Der Leitungsdraht L zwischen beiden Stationen ist nun bei d

an der Achse befestigt, während die vordere Schiene V bei v mit dem einen Pol K der Batterie verbunden ist, deren anderer Pol zur Erde abgeleitet ist. Die hintere Schiene N ist bei n durch den Telegraphenapparat der eigenen Station hindurch zur Erde E abgeleitet.

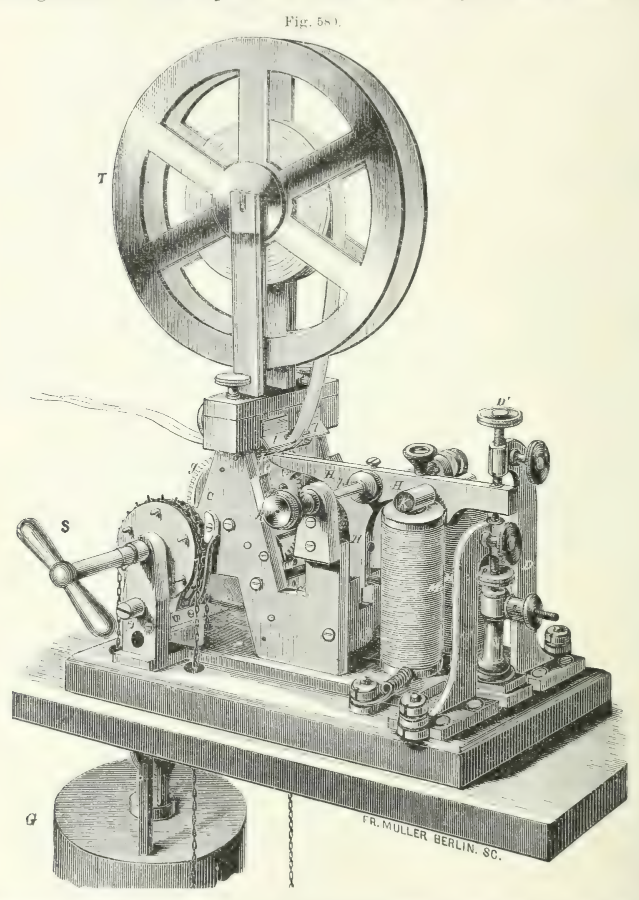
Steht der Schlüssel in der Aufgabestation in der gezeichneten Position, so fließt kein Strom von ihm durch die Leitung, denn bei a ist der Strom unterbrochen. Wird dagegen der Schlüssel heruntergedrückt, so geht der Strom von dem einen Pol K des Elementes durch v, a, α, b', B, d an die Leitung L und kommt dadurch an die zweite Station. Dort steht aber natürlich auch ein solcher Schlüssel, da ja beide Stationen ganz gleich eingerichtet sind, und daher kommt der Strom an das d des dortigen Schlüssels, der aber nicht heruntergedrückt ist, sondern in der gezeichneten Lage sich befindet. Folglich geht der Strom dort durch d, B, b, γ, c, n zum dortigen Apparat und von diesem zur Erde.

Auf diese Weise hat man es in der Hand, durch Herunterdrücken oder Nachlassen des Tasters den Strom von der einen Station nach der anderen zu schicken oder zu unterbrechen, und dieser Strom kann auf der Empfangsstation beliebige elektromagnetische Wirkungen hervorbringen. Soll also die Wirkung darin bestehen, wie es bei dem Morseschen Telegraphen der Fall ist, daß ein Elektromagnet durch den Strom erregt wird, so braucht man nur in der Empfangsstation von n einen Draht zu diesem Elektromagneten zu führen, und den anderen Pol des Elektromagneten mit der Erde zu verbinden, um sofort die nötige Verbindung zu haben. Denn wenn in Fig. 579 der Schlüssel G der ersten Station heruntergedrückt wird, also von der ersten Station aus depeschiert wird, so geht der Strom durch die Leitung L nach dem Schlüssel der zweiten Station, dort durch d, B, b, γ, c, n *um den Elektromagneten* und dann zur Erdplatte. Es ist dann also durch diese Verbindung von der ersten Station aus der Elektromagnet in der zweiten erregt, während der der ersten Station, der auch zwischen n und der Erde sich befindet, selbst nicht von einem Strome durchflossen wird. Ebenso kann man von der zweiten Station aus durch Druck auf den Schlüssel den Elektromagneten der ersten erregen, ohne daß der eigene Elektromagnet beeinflußt wird.

An der Empfangsstation müssen also durch diese einzelnen Ströme, welche den Elektromagneten erregen, Zeichen gegeben werden. Dazu dient der eigentliche *Morseapparat*, welcher in einer älteren, aber übersichtlichen Form in Fig. 580 gezeichnet ist. Der Strom kommt in die Drahtwindungen des Elektromagnets M M. Über dessen Polen befindet sich der eiserne Anker K an einem Hebel H H, welcher an seinem äußersten Ende L eine Spitze trägt. Bei jeder Abwärtsbewegung des Ankers wird die Spitze in die Höhe gehoben und drückt in einen Papierstreifen, der sich an ihr vorbeibewegt, ein Zeichen ein. Ist der Strom nur ein ganz kurzer, so wird der Magnet nur momentan erregt, der Anker also nur momentan angezogen; dann macht die Spitze einen Punkt auf den Papierstreifen. Dauert der Strom etwas längere Zeit, so bewegt sich ein größeres Stück des Papiers an dem Stift vorbei und es erscheint ein Strich auf demselben. Aus Punkten und Strichen ist aber das Morsesche Alphabet zusammengesetzt. Damit der Anker nicht bis zur Berührung

mit dem Magneten angezogen wird, sind bei D und D′ zwei Anschläge angebracht, welche die Bewegung des Hebels H begrenzen. In dieser einfachen Weise werden die Zeichen bei dem Morseschen Schreibapparat hervorgebracht. Das Papierband befindet sich aufgerollt auf einem Pa-

Fig. 580.

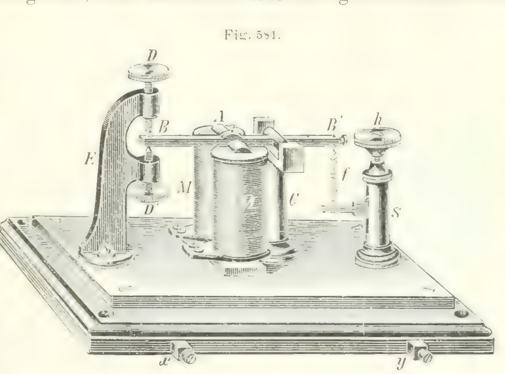


pierträger T und geht durch einen Schlitz zwischen zwei Messingstücken ll und dann zwischen zwei Walzen hindurch, welche aufeinander aufliegen. Die obere Walze wird durch ein Räderwerk gleichmäßig bewegt und nimmt durch Reibung die untere Walze und den Papierstreifen mit. Die Bewegung wird durch ein Gewicht G hervorgebracht, welches an einer

Kette über eine Rolle läuft und dann durch einige ineinander greifende Räder die obere Walze in Rotation bringt. Der Schlüssel S dient zum Aufziehen des Gewichtes, wenn es abgelaufen ist. Das Räderwerk ist es allein, welches diesen Morseschen Schreibapparat in seiner ursprünglichen Form kompliziert aussehen läßt, der im Prinzip und in der Benutzung höchst einfach ist.

Wenn nun zwei Stationen je einen Taster, eine Batterie und einen Schreibapparat haben, so können sie miteinander telegraphisch verkehren, wenn sie nur die Morseschrift kennen. Indes zeigte sich hier bald eine Schwierigkeit. Die Elektromagnete des Schreibapparates brauchen einen ziemlich kräftigen Strom, um überhaupt imstande zu sein, den Anker gehörig anzuziehen, so daß der Stift deutliche Zeichen eindrücken kann. Bei großer Entfernung der beiden Stationen ist aber der Widerstand der Drahtleitung ein so großer, daß man schon eine sehr große Batterie von galvanischen Elementen anwenden müßte, um den Elektromagneten der entfernten Station kräftig zu erregen.

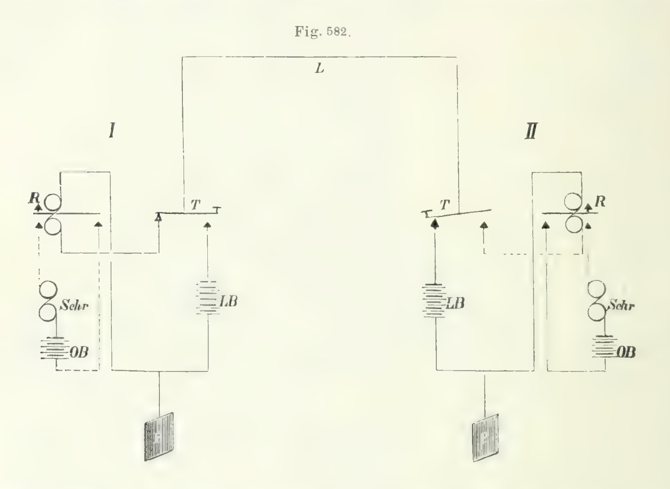
Fig. 581.



Diese Schwierigkeit wurde von Wheatstone zuerst durch ein sehr einfaches Mittel beseitigt. Man läßt nämlich den Strom, der durch die ganze Leitung fließt, nicht direkt den Elektromagneten des Morseapparates erregen, sondern vielmehr einen anderen Elektromagneten auf der Empfangsstation, dessen Anker nur eine ganz geringe Bewegung zu machen braucht, um einen besonderen Strom zu schließen, welcher dann seinerseits den Morseapparat in Tätigkeit bringt. Einen solchen Apparat nennt man ein Relais (Vorspann). In Fig. 581 ist die Abbildung eines solchen gegeben. Der Elektromagnet MM desselben, der mit sehr vielen Umwindungen, 7000 bis 10000, eines dünnen Drahtes umgeben ist, wird von dem Strom, der von der entfernten Station kommt, erregt, auch wenn dieser sehr schwach ist, und zieht dadurch den Anker A ein wenig an. Der Anker A aber ist an einem langen Hebel BB′ befestigt, der sich um eine von dem Ständer C getragene Achse drehen kann. Durch die geringste Anziehung des Ankers aber wird das Hebelende B an die untere Spitze D′ gedrückt, die aus Metall ist (während die obere Spitze D durch Elfenbein isoliert ist), und schließt dadurch einen besonderen Strom. Es wird nämlich an der Empfangsstation ein Strom einer besonderen Batterie bei x eingeleitet, geht durch die Säule E und die Spitze D′ und, wenn B auf D′ aufliegt, durch B B′ und die Säule S zur Klemmschraube y und dann durch den Morseapparat und zur Batterie zurück. Auf diese Weise

erregt der Strom von der entfernten Station (der Linienstrom) gar nicht den Morseapparat selbst, sondern stellt bloß einen Kontakt her, durch den eine besondere Batterie den Morsemagneten erregt. Hört der Linienstrom auf, so wird der Hebel B B′ durch eine Feder f von D′ abgehoben und gegen den isolierten Ruhekontakt D gedrückt. Die Spannung der Feder f kann durch die Schraube h passend reguliert werden und dadurch auch der Abstand des Ankers A von den Magnetpolen. Auch macht man die Kerne der Elektromagnete beweglich, um sie dem Anker nähern oder von ihm entfernen und dadurch die Empfindlichkeit des Relais regulieren zu können. Durch diese Einrichtung des Relais ist also die große Schwierigkeit, die das Telegraphieren auf weite Entfernungen hat, beseitigt. Die schwächsten Ströme genügen schon, um den Anker des Relais in eine geringe Bewegung zu bringen, und eine

Fig. 582.



ganz geringe Verschiebung desselben genügt schon, um den Strom einer kräftigen Batterie zu schließen, die den Morseapparat in Tätigkeit bringt.

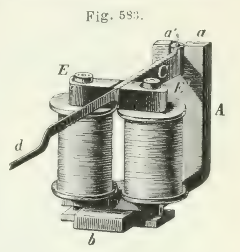
Bei der Anwendung eines Relais muß aber jede Station zwei verschiedene Batterieen haben, eine für den Strom nach der anderen Station, die sogenannte Linienbatterie, und eine für den eigenen Morseapparat, die Ortsbatterie. Wie zwei Stationen mit diesen Apparaten eingerichtet und verbunden sein müssen, ist aus Fig. 582 zu ersehen. Darin bedeutet *L B* die Linienbatterie, *O B* die Ortsbatterie, *Schr* den Morseschen Schreibapparat, R das Relais, T den Taster und P die Erdplatte. Wird z. B. auf der Station II der Taster heruntergedrückt, also telegraphiert, so geht der Strom von dem einen Pol der Linienbatterie II durch den Taster II und die Leitung L zum Taster I. Von diesem geht er um das Relais R zur Erdplatte P und durch die Erde zur Aufgabestation zurück. Durch die Erregung des Relais wird aber der Anker desselben

angezogen und dadurch der Stromkreis der Ortsbatterie geschlossen und der Schreibapparat in Tätigkeit versetzt.

Das Relais ist der empfindlichste Apparat beim Telegraphieren, denn die telegraphierten, also aus weiten Entfernungen kommenden Ströme müssen, auch wenn sie sehr schwach sind, das Relais zum Funktionieren bringen. Es muß ferner im Moment, wo der Strom aufhört, auch der Anker des Relais losgelassen werden, damit die Zeichen am Morseapparat exakt entstehen. Darin besteht nun ein Mangel des eben beschriebenen Relais. Denn in diesem wird der Anker immer durch eine Feder F wieder in seine Gleichgewichtslage zurückgezogen, sobald der Strom aufhört. Es muß also, namentlich beim raschen Telegraphieren, die Feder sehr exakt und zwar dauernd exakt wirken, und das ist schwer praktisch zu erreichen.

Diesem Mangel suchten verschiedene Konstrukteure auf verschiedene Weise abzuhelfen. Radikal wird er dadurch beseitigt, daß man das Relais ganz ohne Feder konstruiert. Dies haben S i e m e n s & H a l s k e getan, indem sie durch den Linienstrom einen Magneten nicht erst erregen, sondern durch ihn nur schon vorhandene Magnetpole verstärken und schwächen ließen. Die nach diesem Prinzip konstruierten Relais nennt man p o l a r i s i e r t e R e l a i s. In Fig. 583 ist ein solches abgebildet. Ein p e r m a n e n t e r Stahlmagnet A b ist rechtwinklig gebogen und hat bei a a' seinen Südpol, bei b seinen Nordpol. Auf dem Nordpol sitzen zwei Kerne aus weichem Eisen auf, welche also ebenfalls nordmagnetisch werden. Diese Nordpole sind mit Draht umwickelt. An dem Südpol a a' ist der Stahlmagnet etwas aufgeschnitten und in dem Zwischenraume befindet sich der lange Hebel C d aus weichem Eisen, welcher um eine vertikale Achse drehbar ist. Dieser Hebel ist also ebenfalls südmagnetisch wie der Pol, an dem er befestigt ist. Der Hebel befindet sich zwischen den beiden Nordpolen im Gleichgewicht, wenn kein Strom durch die Spiralen der Kerne läuft. Nun wird der Strom der Linienbatterie an der Empfangsstation zuerst durch eine primäre Spule gesendet, um welche eine sekundäre Spule gewickelt ist, die mit den Spulen des Relais verbunden ist. Sowie der Linienstrom zu fließen anfängt, wird in der sekundären Spule ein Induktionsstrom erregt, und dieser fließt einen Moment in solcher Richtung um beide Magnetkerne, daß der eine, z. B. E, stärker nordmagnetisch, der andere E' schwächer nordmagnetisch oder vielleicht gar südmagnetisch wird. Dadurch wird der Hebel C d an E herangezogen und seine Spitze d schließt dadurch den Lokalstrom. Sowie der Linienstrom aufhört, wird in der Induktionsspule ein umgekehrter Strom erzeugt und dieser fließt also umgekehrt durch die Windungen und macht nun E' stärker und E schwächer nordmagnetisch. Dadurch wird der Hebel sofort nach E' gezogen und der Lokalstrom geöffnet. Auf diese Weise erhält man die Relaiswirkung ganz ohne Feder, und mit vollkommener Sicherheit und Präzision folgt der Hebel C d, dessen äußeres Ende nicht aus Eisen, sondern aus Neusilber ist, den Stromschließungen und Stromöffnungen. Die Verbindung des polarisierten Relais, welches

Fig. 583.

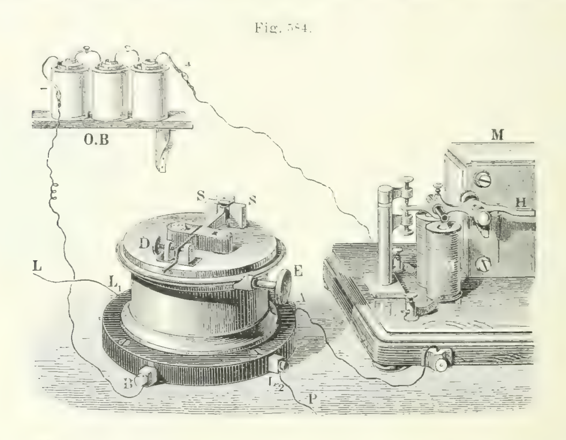


zweckmäßig die Form einer Dose hat und daher auch Dosenrelais genannt wird, mit dem Schreibapparat M und der Ortsbatterie O B ist in Fig. 584 gezeichnet. Sobald durch den Linienstrom, der bei L_1 eintritt und bei L_2 in die Erde geht, der Hebel des Relais gegen die Spitze D gezogen ist, ist die Ortsbatterie O B geschlossen, von der der Strom bei B in das Relais eintritt und bei A zum Schreibapparat geht.

Man kann auch die Polarisationswirkung mit der Federwirkung kombinieren, um ein empfindliches und leicht regulierbares Relais zu erhalten. Eine solche Kombination ist bei dem deutschen polarisierten Relais benutzt, welches in der Reichstelegraphie hauptsächlich angewendet wird.

Durch Zuhilfenahme des Relais ist es nun möglich, auf weite Entfernungen ebenfalls sicher zu telegraphieren. Werden die Entfernungen, zwischen denen telegraphiert werden soll, aber so groß, daß auch die empfindlichen Relais auf den schwachen ankommenden Strom nicht mehr reagieren würden, so kann man durch Aufstellung von Relais an einer Zwischenstation trotzdem eine exakte telegraphische Verbindung herstellen. Der an der Zwischenstation ankommende Linienstrom bringt den Relaishebel in Bewegung und dieser bewirkt, daß eine in der Zwischenstation aufgestellte Batterie nun ihren Strom in die weitere Leitung zu der entfernten Endstation sendet. Durch eine oder mehrere solche Übertragungsstationen kann man also selbsttätig, ohne daß ein Beamter mitzuwirken oder die Depesche aufzunehmen braucht, auf die weitesten Entfernungen, über ganze Kontinente telegraphisch sprechen.

Fig. 584.



Das Buchstabensystem bei dem Morsetelegraphen wird aus den beiden Elementarzeichen Punkt und Strich zusammengesetzt, und zwar in folgender Weise:

a	ä	b	c	d	e	f	g	h	i
· —	· — · —	— · · ·	— · — ·	— · ·	·	· · — ·	— — ·	· · · ·	· ·

j	k	l	m	n	o	ö	p
· — — —	— · —	· — · ·	— —	— ·	— — —	— — — ·	· — — ·

q	r	s	t	u	ü	v	w	x
— — · —	· — ·	· · ·	—	· · —	· · — —	· · · —	· — —	— · · —

y	z	ch
— · — —	— — · ·	— — — —

1	2	3	4	5	6
· — — — —	· · — — —	· · · — —	· · · · —	· · · · ·	— · · · ·

7	8	9	0
— — · · ·	— — — · ·	— — — — ·	— — — — —

Außer diesen Zeichen sind noch eine große Zahl einzelner Dienstzeichen international verabredet.

Bei der beschriebenen Einrichtung der Morsetelegraphie wird die Linienbatterie der Aufgabestation durch den Taster geschlossen, wenn ein Zeichen telegraphiert werden soll, sonst ist sie offen und es geht kein Strom durch die Linie. Man nennt dies das Telegraphieren mit Arbeitsstrom. Häufig jedoch läßt man dauernd einen Strom durch die Linie gehen und das Telegraphieren besteht dann darin, daß dieser Strom in bestimmter Weise, länger oder kürzer, unterbrochen wird. Dies nennt man Telegraphieren mit Ruhestrom. Jede von diesen beiden Methoden hat gewisse Vorzüge und es werden daher auch beide gleich häufig angewendet.

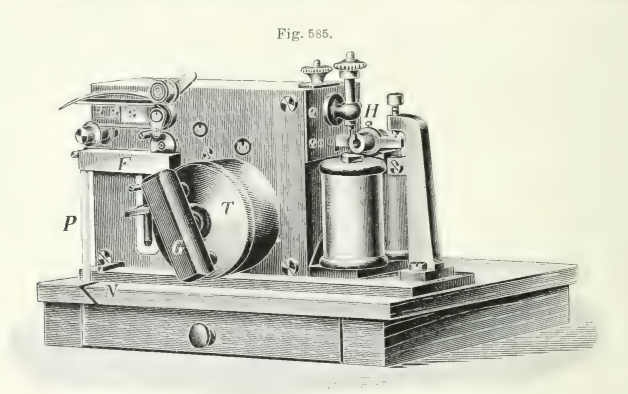
Der Morsesche Schreibapparat, wie er oben beschrieben ist, gab die telegraphierten Buchstaben durch Punkte und Striche wieder, die durch den Stift in das Papier eingedrückt wurden. Es zeigte sich aber bald, daß diese Zeichen nicht deutlich genug werden, und man suchte deshalb die Buchstabenzeichen farbig zu schreiben. Danach nennt man den früher beschriebenen Apparat einen Stiftschreiber, während man die nun zu erwähnenden Farbschreiber nennt. Um die Schrift farbig zu erzeugen, läßt man durch den Anker des Morsemagneten an den Papierstreifen länger oder kürzer ein mit Farbe versehenes Rädchen drücken. Dadurch werden die Zeichen alle farbig erzeugt.

Nach vielen Veränderungen ist jetzt bei den Telegraphen in der deutschen Reichstelegraphie ein Morsefarbschreiber eingeführt, der in Fig. 585 abgebildet ist. Man sieht rechts an dem Apparat den Elektromagneten mit seinem Anker H, welcher sich zwischen zwei verstellbaren Anschlägen auf und ab bewegen kann. Der Anker setzt sich nun im Innern des Kästchens fort und umfaßt dort mit einem Griffe die Achse des Farbrädchens. Die Farbe befindet sich in einem Kästchen F, in welches das Farbrad taucht. Das Farbrädchen wird also durch den Schreibhebel gehoben, wenn dieser angezogen wird, und daher an den Papierstreifen angedrückt, wenn ein Strom durch den Apparat geht. Dadurch macht es auf dem Papier blaue Striche oder Punkte. Die Papierrolle befindet sich in dem Kasten, welcher den Boden des Apparates bildet, und das Papier P wird durch die in der Figur sichtbare Art und Weise bei N herausgezogen. Die Triebkraft für das Uhrwerk, welches das Papier herauszieht, besteht in einer Feder,

welche in dem großen Federhaus T sich befindet und durch den Schlüssel G aufgezogen wird. Der Elektromagnet dieses Apparates besteht aus hohlen Eisenröhren statt der massiven Eisenkerne, damit der Magnetismus durch den Strom rasch entsteht und verschwindet.

Auch bei den Morseapparaten haben Siemens & Halske in manchen Fällen dasselbe Prinzip angewendet, wie bei ihrem polarisierten Relais. Da nämlich für den Elektromagneten ähnliche Schwierigkeiten sich ergaben, wie für das Relais, daß nämlich die Feder den Anker nicht stets sofort genügend zurückzieht, wenn der Strom aufhört, daß also die Zeichen nicht exakt wurden, so brachten sie schon von vornherein permanente Magnete an dem Morseapparat an. Solche Schreibapparate,

Fig. 585.



die zugleich mit einer Färbevorrichtung versehen sind, nennt man polarisierte Farbschreiber.

Wenn eine Depesche ankommt und sich aufzeichnen soll, so muß das Triebwerk, welches den Papierstreifen bewegt, losgelassen werden, und es muß gehemmt werden, wenn die Depesche aufgenommen ist. Es wird dazu an passender Stelle ein Sperrhaken angebracht, welcher in eines der Räder des Uhrwerks eingreifen und dadurch die Bewegung hemmen kann, und welcher andererseits, sowie der Apparat in Gang kommen soll, von dem Rade fortgedreht werden muß.

Der Morseapparat mit allen seinen Verbesserungen und Verfeinerungen ist im Grunde ein sehr einfacher Apparat. Das einzig Mißliche ist bei ihm, daß er eine besondere Schrift nötig hat. Dadurch ist es erstens notwendig, das Telegraphieren und das Lesen der Telegramme besonders zu erlernen, und zweitens die empfangenen Telegramme in gewöhnliche Schrift zu übertragen. Ferner besteht jeder Buchstabe aus mehreren Zeichen, die einzeln telegraphiert werden müssen. Es entsteht dadurch ein Zeitverlust beim Telegraphieren, welcher gerade bei diesem raschen Verkehrsmittel möglichst vermieden werden sollte. Außerdem können beim Telegraphieren selbst leicht Irrtümer entstehen, da ja die einzelnen Drucke

auf den Taster rasch vorübergehen und nicht ohne weiteres kontrolliert werden können.

Mit einem Morseapparat kann ein geübter Telegraphist ungefähr 60 bis 70 Buchstaben in der Minute depeschieren. Für die meisten Zwecke ist diese Geschwindigkeit des Telegraphierens bisher ausreichend. Aber für die Verbindung großer Städte untereinander, bei denen der telegraphische Verkehr ein sehr lebhafter ist, mußte man das Depeschieren sowohl rascher als bequemer machen, und — das war eine Hauptsache — das Telegramm sofort in Druckschrift an der Empfangsstation aufzeichnen lassen. Es mußten eigene Typendrucktelegraphen konstruiert werden, welche dies ermöglichen sollten.

Von diesen Apparaten hat sich der Typendrucktelegraph von Hughes allgemein eingeführt, mit welchem man trotz seines überaus komplizierten Aussehens leicht und sicher telegraphieren kann und welcher die Geschwindigkeit des Zeichengebens auf das Doppelte, die Geschwindigkeit der Abfertigung der Telegramme aber auf das Fünffache gegen den Morseapparat erhöht. Hughes erlangte die ersten Patente auf seinen Typendrucker 1855 und sein Apparat wurde zuerst zwischen Paris und London 1866 in Gebrauch genommen.

Auch bei dem Hughesschen Telegraphen wird die elektromagnetische Wirkung des Stromes benutzt. Durch den ankommenden Strom wird auf der Empfangsstation ein Elektromagnet erregt, welcher seinen Anker anzieht und durch diesen einen sich abrollenden Papierstreifen an ein Rad drückt, auf dessen Umfang die Buchstaben, Ziffern und Interpunktionen sich befinden. Auf jedem Apparat befindet sich ein derartiges Rad, das sogenannte Typenrad. Dieses wird durch ein Räderwerk in fortlaufende, rasche Rotation versetzt, und zwar müssen die Typenräder an der Aufgabestation und an der Empfangsstation sich gleich rasch drehen und sich stets in gleicher Lage befinden, es muß Synchronismus der Bewegung an beiden Stationen stattfinden. Dieser Synchronismus wird durch einen besonderen Apparat, den Regulator, hervorgebracht, den wir nachher erörtern. Nun ist es bloß nötig, in dem Moment, wenn der zu telegraphierende Buchstabe des Typenrades (in beiden Stationen) an die unterste Stelle gelangt ist, das Papier der entfernten Station zu heben, so daß sich dieser Buchstabe auf dem Papier abdrucken kann. Dies wird eben elektromagnetisch erreicht. Zu dem Ende hat der Hughessche Typendrucker, von dem Fig. 586 die äußere Ansicht in der Form gibt, wie sie jetzt von Siemens & Halske ausgeführt wird, eine Klaviatur, welche auf den einzelnen Tasten die Buchstaben, Zahlen und Zeichen trägt, und durch welche beim Niederdrücken einer Taste ein Strom in die entfernte Station gesendet wird. Und zwar ist die Einrichtung der Apparate so getroffen, daß der Strom nur dann in die Leitung nach der entfernten Station gelangen kann, sobald (oder kurz bevor) der zu druckende Buchstabe des Typenrades an die unterste Stelle gelangt ist. In Fig. 586 ist A das Typenrad, E der Elektromagnet, dessen Anker das kleine Druckrad, über welches der Papierstreifen läuft, und mit ihm den Papierstreifen zur geeigneten Zeit gegen das Typenrad schnellen läßt. Die Klaviatur steht in Verbindung mit der Stiftbüchse C, über welcher der Kontaktschlitten L rotiert. Diese sind es gerade, welche

dazu dienen, daß der Strom von der niedergedrückten Taste erst dann in den entfernten Apparat fließt, wenn der zu druckende Buchstabe am Typenrad dort gerade an der untersten Stelle, also über dem Druckrad ankommt, diese sind also die wichtigsten Teile des Apparates. In Fig. 587 ist daher diese Stiftbüchse mit ihren Löchern η und dem Kontaktschlitten L besonders abgebildet. Unter den Löchern befinden sich die einzelnen

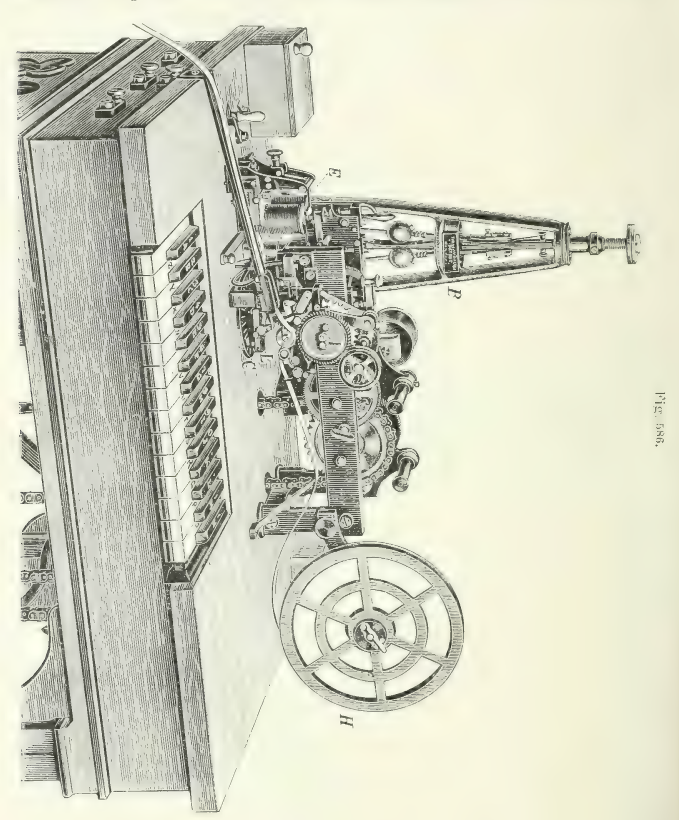
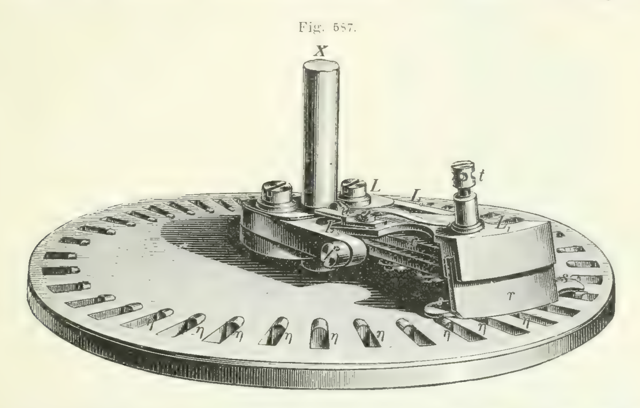


Fig. 586.

Stifte, die mit den Tasten der Klaviatur in Verbindung sind und durch einen Druck auf die Tasten gehoben werden, so daß sie etwas aus den Löchern hervorragen. Der Kontaktschlitten L rotiert nun fortwährend über der Stiftscheibe, und zwar mit derselben Geschwindigkeit, wie das Typenrad. Er befindet sich gerade immer über demjenigen Loche, dessen entsprechender Buchstabe auf dem Typenrad gerade die unterste Stelle einnimmt

(und zwar wegen des Synchronismus sowohl auf der einen wie auf der anderen Station). Sowie der Schlitten nun an einen gehobenen Stift kommt, wird durch diesen Stift eine Trennung zweier Teile des Schlittens hervorgebracht, wie man aus Fig. 588 ersehen kann. Befindet sich der Stift q, welcher mit der Taste ϑ in Verbindung ist, in gehobener Lage, wie sie punktiert gezeichnet ist, so wird das Stück r des Schlittens, die L i p p e, gehoben, sobald der Schlitten an diese Stelle kommt, und es wird dadurch die Spitze t von x abgehoben. Dadurch geht aber ein Strom aus dem Stifte q (der mit der Batterie verbunden ist) durch t nach X, der Schlittenachse, und von da aus in die Leitung zum anderen Apparat. Da die Bewegung des Schlittens nun eine synchrone mit dem Typenrad ist, so kommt gerade, wenn der betreffende Buchstabe des Typenrades unten eingestellt

Fig. 587.



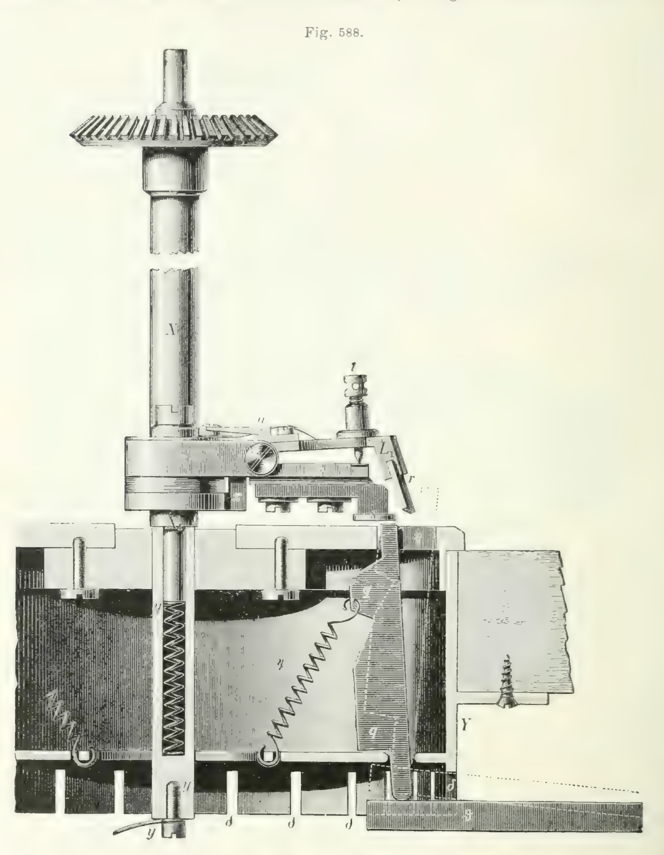
ist, der Strom in die Leitung, und dadurch wird das Papier, das von dem Papierträger H abläuft, an der zweiten Station ein wenig gehoben und die Type abgedruckt.

Dies ist im allgemeinen die Einrichtung des Hughesschen Telegraphen, der ein wirkliches mechanisches Kunstwerk ist, mit dem an Kunst nur die Nähmaschine wetteifern kann. Alle seine Teile, und es sind deren eine sehr große Menge, greifen mit der größten Exaktheit ineinander und sind dabei doch so eingerichtet, daß sie leicht herausgenommen und repariert werden können.

Die Geschwindigkeit, mit der sich das Typenrad bewegt, ist eine sehr erhebliche. Für gewöhnlich macht es 100 bis 120 Touren in der Minute. Ursprünglich wurde der Apparat nur durch fallende Gewichte in Bewegung gesetzt, wie sie die Fig. 586 andeutungsweise unter dem Tisch anzeigt. Jetzt verwendet man häufig elektrischen Antrieb, indem ein kleiner Elektromotor auf dem Apparattisch sitzt, dessen Achse durch Kegelräder mit der Schwungradachse des Apparates gekuppelt ist. Der gezeichnete Apparat, Fig. 586, kann sowohl durch Gewichte, wie auf elektrischem Wege betrieben werden. Um die Geschwindigkeit zu regulieren, brachte Hughes selbst an seinem Apparat ein horizontal liegendes

Pendel an. Jetzt wird häufig ein vertikal stehender Zentrifugalregulator benutzt, wie er in Fig. 586 bei B gezeichnet ist. Fig. 589 zeigt die Verbindung des Elektromotors E mit dem Zentrifugalregulator. Die Pendelstangen des Zentrifugalregulators spreizen sich bei wachsender Geschwindigkeit immer mehr, bis sie sich an einen Bremsring anlegen. Durch diesen wird

Fig. 588.

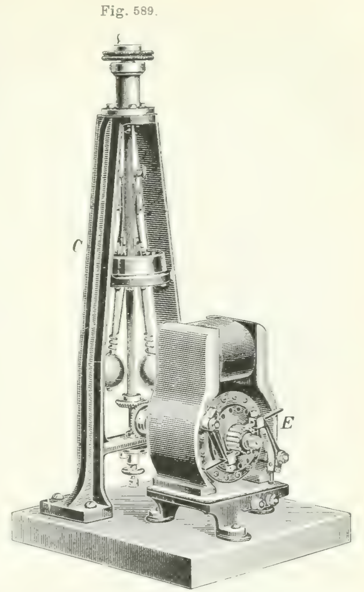


die Geschwindigkeit wieder verringert, die Pendelstangen gehen wieder zusammen und so kann man die Geschwindigkeit konstant halten und durch Heben oder Senken der Kugeln auf ihren Stangen innerhalb gewisser Grenzen auf jede Größe einstellen. Vor jedem Telegraphieren müssen sich die Beamten erst überzeugen, ob die beiden Typenräder synchron sich bewegen, was dadurch konstatiert wird, daß man dieselbe

Taste mehrere Male drückt und nachsieht, ob immer derselbe Buchstabe gedruckt wird. Ist das nicht der Fall, dann reguliert der Beamte der zweiten Station die Geschwindigkeit seines Apparates, bis sie mit der auf der ersten Station übereinstimmt.

Mit den Morseschen und Hughesschen Telegraphen wird jetzt allgemein telegraphiert.

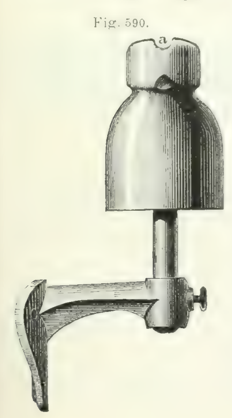
Fig. 589.



Eine besondere Aufgabe in der praktischen Telegraphie ist die Verbindung mehrerer Stationen untereinander. Zwischen zwei Stationen, die miteinander telegraphieren wollen, liegt gewöhnlich eine Reihe von Zwischenstationen. Außerdem ist von den Hauptstationen aus immer eine Umschaltung des Stromes nach anderen Linien erforderlich. Alle die dazu nötigen Anordnungen und Vorschriften, die unter dem Begriff der S c h a l t u n g s l e h r e zusammen gefaßt werden, liegen außerhalb des Rahmens dieses Buches, sie sind in speziellen Werken über Telegraphie enthalten.

Die Verbindung zwischen zwei Landstationen kann entweder eine oberirdische sein oder eine unterirdische. Man nimmt für die oberirdischen Leitungen verzinkten Eisendraht oder Siliziumbronzedraht von 4 mm Durchmesser, bei großen Verkehrslinien auch von 5 mm Durchmesser. Der Draht muß natürlich gut leitend und isoliert sein. Es müssen deshalb die einzelnen Drähte einer Linie sorgfältig miteinander verbunden werden, was durch feste Umschlingung und Verlötung der Enden erreicht wird. Um gute Isolation an den Unterstützungspunkten zu erreichen, verwendet man als Träger gewöhnlich Holzstangen und windet die Drähte um isolierende Porzellanglocken, wie Fig. 590 eine zeigt.

Fig. 590.

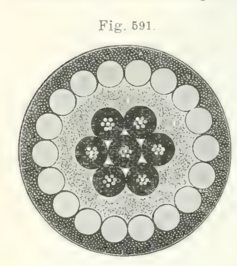


Viel schwieriger ist die unterirdische Verbindung zweier Stationen, die aber z. B. in Deutschland aus militärischen Gründen neben der oberirdischen zwischen allen Hauptstädten eingeführt ist. Dabei müssen die Drähte in das feuchte Erdreich oder in Flüsse gelegt werden, und um hier genügende Isolation zu erreichen und zugleich die Drähte vor Zerstörung durch Feuchtigkeit zu schützen, müssen sie mit iso-

lierendem und widerstandsfähigem Material umkleidet werden. Man benutzt also dazu Kabel. Im Anfang hatte die Telegraphie große technische Schwierigkeiten zu überwinden, bevor es gelang, genügend isolierte und sichere Kabel anzufertigen.

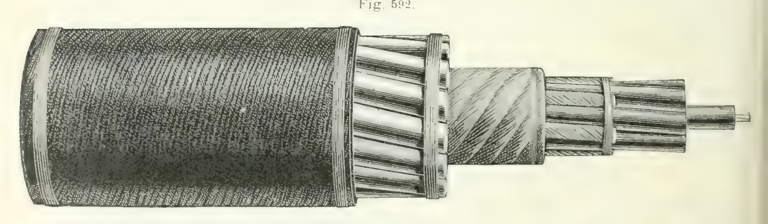
Man verwendet für die Kabel nur Kupferdrähte und bringt eine Anzahl von Leitungen in dasselbe Kabel. Die Leitungen bestehen entweder aus Kupferdrähten oder aus Kupferlitzen. Von den deutschen unterirdischen Kabeln zeigt Fig. 591 einen Durchschnitt. Es ist das ein siebenadriges Kabel, jede Ader besteht aus einer Litze, die aus sieben dünnen Drähten zusammengedreht ist. Jede Ader ist mit einer Guttaperchahülle umpreßt, was die Aufgabe eines besonderen Fabrikationszweiges ist. Diese Guttaperchaadern werden nun umeinander gewunden, so daß etwa sechs im Kreise um eine siebente herumliegen. Diese Schicht nennt man die Kabelseele. Um die Seele wird eine doppelte Lage von geteertem Jutehanf gelegt und diese mit einer Hülle von verzinkten Eisendrähten umgeben. Das ganze Kabel wird dann asphaltiert und nochmals mit Jutehanf umsponnen. Fig. 592 zeigt ein solches eisenarmiertes Guttaperchakabel.

Fig. 591.



Die ersten Telegraphenanlagen entstanden in Deutschland 1830, und vom Jahre 1843 ab verbreitete sich die Telegraphie allgemein so rasch, daß in einigen Jahrzehnten sich ein Netz von Telegraphendrähten über alle Länder ausbreitete. Schon früh, im Jahre 1843, hegte Wheatstone wohl zuerst den Plan, auch unterseeische Telegraphenleitungen zu legen, und das gelang auf kurze Strecken ziemlich bald, so schon 1852 zwischen England und Irland. Bei längeren Kabeln, z. B. solchen durch das Mittelmeer, wuchsen die Schwierigkeiten schon bedeutend, da das Legen eines Kabels auf tiefen Meeresgrund außerordentlich leicht ein Zerreißen des Kabels verursacht. Man mußte Schiffe zur Kabellegung mit besonderen Einrichtungen bauen, um diese Kabelverbindungen mit Sicherheit auszuführen. Das große Problem aber war die Legung eines Kabels zwischen Europa und Amerika durch den Atlantischen Ozean. Die Lösung dieses Problems erforderte außerordentliche Arbeiten und Kosten und gelang erst nach vielen Mißgeschicken. Die Versuche begannen schon im Jahre 1857, wo man am 6. August anfing, ein Kabel zwischen Irland

Fig. 592.



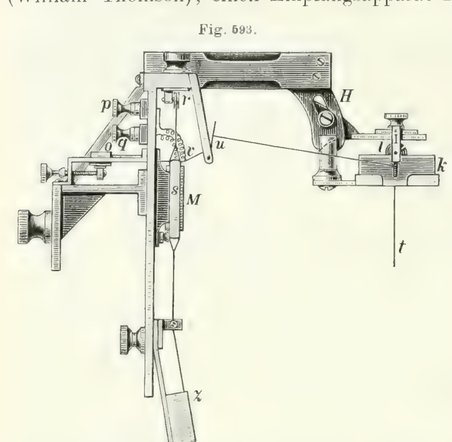
und Amerika zu legen. Aber bereits am 11. August riß dasselbe, etwa 70 deutsche Meilen von der Küste. Das Jahr 1858 brachte neue Versuche unter Berücksichtigung der gewonnenen Erfahrungen, aber wieder riß das eine Kabel, während das andere nach kurzer Zeit zerstört wurde. Erst 1864 war wieder ein Kabel fertig von an 600 deutschen Meilen Länge, es wurde auch glücklich durch den „Great Eastern“ gelegt, zerriß aber bald wieder (1865) mitten im Meere, etwa 250 Meilen von Irland entfernt. Endlich im folgenden Jahre, 1866, wurde ein neues Kabel gelegt, welches bis nun, trotz mancher Beschädigungen, ausgehalten hat. Zugleich wurde das Kabel vom Jahre 1865 durch den „Great Eastern“ wieder aufgefischt und ausgebessert, und so waren sofort zwei telegraphische Verbindungen zwischen Europa und Amerika hergestellt. Heute bestehen 18 Kabelverbindungen zwischen Europa und Amerika. In kurzer Folge wurden dann durch Kabel fast alle Teile der zivilisierten Welt miteinander verbunden.

Die Kabeltelegraphie fand zuerst sehr unerwartete Schwierigkeiten vor, auch abgesehen von den Unfällen bei der Legung der Kabel. Es zeigte sich nämlich, daß ein solches Kabel, welches ja aus inneren Kupferdrähten und äußeren Eisendrähten und einer isolierenden Zwischenschicht besteht, als Kondensator wirkt. Es sammelt sich also auf einem solchen Kabeldraht, der mit dem einen Pole einer Batterie verbunden ist, Elektrizität an, da ja die Kapazität eines Kondensators infolge der Anwesenheit der influenzierten Hülle eine große ist. Man erhält also Ladungserscheinungen auf dem Kabel. Und da ein Teil der Elektrizität zunächst so zum Laden der Oberfläche des Drahtes verbraucht wird, so entsteht in dem Kabel die volle Stromstärke, die zur Erzeugung der Zeichen auf der zweiten Station notwendig ist, nur allmählich, es findet also eine erhebliche Verzögerung des Stromes statt. Zunächst also kann man deswegen auf Kabeln nur langsamer telegraphieren als auf oberirdischen Leitungen. Aber es kommen noch andere Übelstände dazu. Wenn nämlich von der ersten Station aus ein Kabel geladen ist und dann die Batterie beim Telegraphieren von dem Kabel momentan entfernt wird, also das Kabel an der ersten Station mit der Erde in Verbindung gebracht wird, so fließt ein Teil der auf dem Draht angesammelten Elektrizität in entgegengesetzter Richtung durch die Apparate in die Erde. Es entsteht der sogenannte Entladungsstrom oder Rückstrom. Es geht also durch die Apparate nach jedem Telegraphierstrom ein Strom in entgegengesetzter Richtung, und dadurch kommen alle die Apparate in unbeabsichtigte und schädliche Tätigkeit. Man hat diesen Rückstrom auf verschiedene Weise paralysiert. Durch Anwendung der polarisierten Relais und der polarisierten Farbschreiber wird die Wirkung des Entladungsstromes unschädlich gemacht, da ja bei diesen eben nur ein Strom in einer bestimmten Richtung die beabsichtigte Wirkung hervorbringt. Bei der Submarintelegraphie, die mit viel empfindlicheren Apparaten arbeitet, als es die Farbschreiber sind, hilft man sich zum Teil dadurch, daß man bei jeder Öffnung des Telegraphierstromes einen entgegengesetzten Strom vermittels einer besonderen Batterie durch die Leitung sendet und dadurch den Rückstrom paralysiert. Bei großen unterseeischen Entfernungen wendet man

fast allgemein Kondensatoren an, durch die derselbe Zweck erreicht wird.

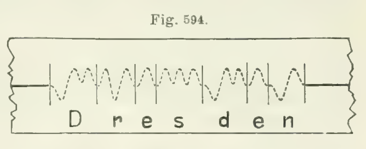
Bei der transatlantischen Telegraphie hat der Strom eine so lange Leitung zu durchlaufen, daß man nur sehr schwache Ströme an der Empfangsstation erhält. Um mit solch schwachen Strömen Zeichen geben zu können, ging man zunächst auf die von Gauß und Weber angewendete, aber allerdings bedeutend verfeinerte, Methode der Nadeltelegraphie zurück. Die Ströme wurden durch die Windungen eines sehr empfindlichen Spiegelgalvanometers gesendet und die Ausschläge des Magneten durch ein Fernrohr beobachtet. Indes gelang es Lord Kelvin (William Thomson), einen Empfangsapparat zu konstruieren, der, auf ähnlichem Prinzip beruhend, auch dauernde Schriftzeichen durch die Kabel zu übermitteln gestattet. Dieser Apparat wird Syphonrekorder oder Heberschreibapparat genannt. Thomson hat in diesem Apparat die Einrichtung, wie sie bei den Deprezschen Galvanometern (S. 187 f.) benutzt wird, um fast 30 Jahre vorweggenommen. Bei dem Syphonrekorder befindet sich nämlich, um bloß die Hauptteile zu nennen, wie bei den Deprez-Galvanometern, eine Drahtspule s (Fig. 593) zwischen den Polen eines kräftigen Elektromagneten M. In die Spule treten die durch das Kabel ankommenden Ströme vermittels p und q ein, und die Spule, die an Fäden aufgehängt ist, dreht sich, wie wir wissen. Mit der Spule ist nun durch einen gespannten Faden v, u, t ein kleiner Glasheber verbunden, der in ein Gefäß mit Farbflüssigkeit eintaucht und der durch eine Art Neefschen Hammers dauernd in Vibration versetzt wird, so daß die Farbe dauernd aus ihm in kleinen Tröpfchen ausspritzt. Vor diesem Heber wird nun ein Papierband in gewöhnlicher Weise vorbeigezogen und die Farbe spritzt auf dieses Papier. Die Bewegungen der Drahtspule, die man Rekorderspule nennt, gehen bald nach der einen, bald nach der anderen Seite, da man mit abwechselnd gerichteten Strömen telegraphiert, und infolgedessen schreibt der Heber (Syphon) eine Linie mit hin und her gehenden Ausbuchtungen auf dem Papier. Da jeder Buchstabe durch bestimmte Bewegungen charakterisiert ist, so hat man damit sichtbare Telegraphenschrift, die man Rekorderschrift nennt. Fig. 594 gibt eine Ansicht der Rekorderschrift. Durch die Anwendung des Syphonrekorders ist die Geschwindigkeit, mit der man auf Kabeln telegraphieren kann, außerordentlich vergrößert worden.

Fig. 593.



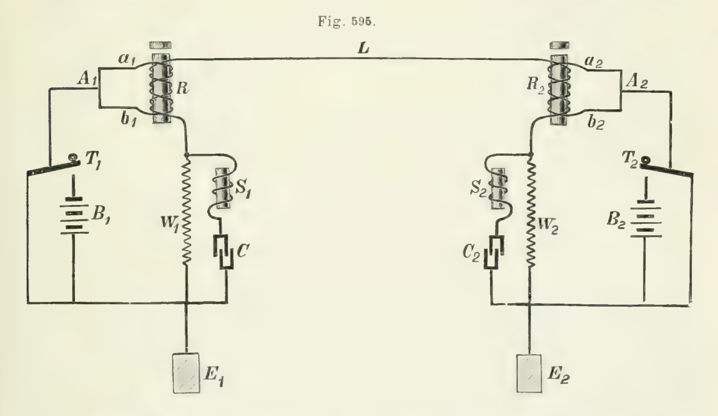
Die großen Kapitalien, die in den Kabeln investiert sind, machen es praktisch nötig, dieselben für den Verkehr möglichst auszunutzen, damit sie genügenden Ertrag abwerfen, ohne daß man doch die Kosten der Telegramme ins Ungemessene erhöhen darf, da sonst der Verkehr, anstatt zuzunehmen, vielmehr abnehmen würde. Dasselbe ist aber auch bei den oberirdischen Leitungen der Fall. Auch diese erfordern so hohe Anlagekosten, daß man versuchen muß, sie so vollständig wie möglich auszunutzen.

Fig. 594.



Aus diesen Gründen hat man schon früh die Frage aufgeworfen, ob man nicht gleichzeitig durch denselben Draht zwischen zwei Stationen eine Depesche in der einen und in der anderen Richtung senden könne. Man nennt diese Aufgabe die des telegraphischen Gegensprechens. Man kann natürlich Ströme gleichzeitig von der einen Seite und der anderen

Fig. 595.



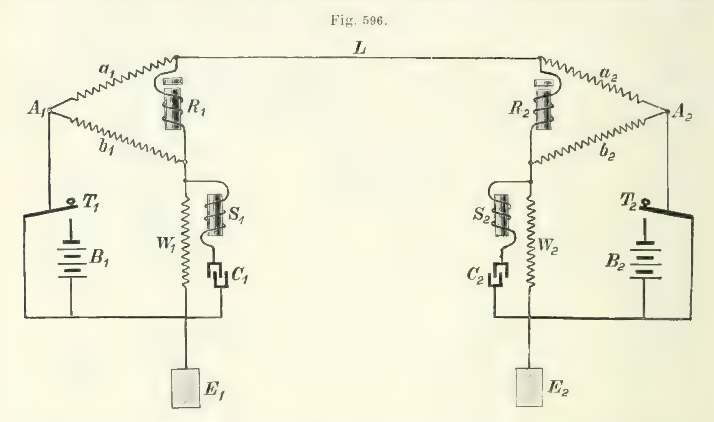
in den Draht senden, aber diese gehen nicht etwa durcheinander durch, wie die Wellen auf einem Teich, sondern sie addieren oder subtrahieren sich. Und die Aufgabe, die zu lösen war, war die, daß der Strom, der vom ersten Amt aus gesendet wird, nicht den eigenen Morseapparat (oder das eigene Relais) in Tätigkeit setzen darf, sondern nur das der zweiten Station, und daß umgekehrt der gleichzeitige Strom von der zweiten Station nicht das eigene, sondern nur das Relais der ersten Station bewegen darf.

Diese Aufgabe ist einfacher, als man zunächst glauben könnte, durch besondere Schaltungen der Apparate gelöst worden, und zwar sogar durch zwei verschiedene Schaltungsarten.

Am einfachsten verständlich ist die Differentialmethode. Bei dieser wird der Strom der gebenden Station I (Fig. 595) verzweigt, so daß seine zwei Teile durch zwei getrennte Windungen des Relais R gehen,

die so geschaltet sind, daß die Ströme sich in bezug auf die Magnetisierung des Relais entgegenwirken und aufheben (Differentialschaltung). Die eine dieser Windungen ist mit der Leitung L nach der entfernten Station und dadurch mit dem dortigen Apparat verbunden. Die zweite Windung muß daher, um einen Strom von derselben Stärke zu erhalten, mit einer elektrisch genau gleichen Leitung verbunden sein, die man ein künstliches Kabel nennt und von denen eines an der Aufgabestation und ebenso eines an der Empfangsstation aufgestellt ist. Das künstliche Kabel muß dem wirklichen Kabel und dem Empfangsapparat der anderen Station genau gleichwertig sein. Es muß also erstens denselben Widerstand haben. Es

Fig. 596.



muß aber zweitens, da man es ja mit kurzdauernden Strömen, nicht mit konstanten Strömen zu tun hat, auch dieselbe Selbstinduktion besitzen und es muß drittens dieselbe Kapazität besitzen, wie das wirkliche. Das künstliche Kabel wird daher aus Widerstandsrollen W_1 resp. W_2 ohne Selbstpotential, dann aus einer parallel geschalteten Rolle mit Selbstpotential S_1 resp. S_2 und schließlich aus einem parallel geschalteten Kondensator C_1 resp. C_2 gebildet, dessen Kapazität gleich der des wirklichen Kabels gemacht wird. Schließt man nun durch den Taster T_1 der ersten Station die Batterie B_1, so geht deren Strom in gleicher Stärke durch b_1 in das künstliche Kabel, wie durch a_1 in das wirkliche Kabel, erregt also das Relais der eigenen Station nicht. An der Ankunftstation II aber geht der Strom nur durch die eine Relaiswickelung zur Erde, das dortige Relais R_2 spricht also an. Ebenso ist es, wenn gleichzeitig Station II spricht; ihr Relais wird dadurch nicht beeinflußt, wohl aber das Relais der ersten Station und so ist das Problem des Gegensprechens auf diese Weise gelöst.

Ein zweites Mittel zum Gegensprechen besteht in der Anwendung einer Schaltung, welche die Wheatstonesche Brücke ergibt, der Brückenmethode. Bei dieser Brückenschaltung kann man ja, während alle Zweige von einem Strom durchflossen werden, den Brückenzweig stromlos machen, wenn man den vier anderen Zweigen das bekannte (S. 74 erwähnte) Verhält-

nis gibt. An jedem Amt wird der eigene Telegraphenapparat resp. das Relais (R_1 bzw. R_2 in Fig. 596) in die Brücke der Wheatstoneschen Kombination geschaltet. Von der Batterie B_1 der ersten Station geht der Strom durch den Taster T_1 zu der Wheatstoneschen Brücke der ersten Station und verzweigt sich hier einerseits in die beiden Widerstände a_1 und b_1, andererseits in die beiden Leitungen, nämlich das Kabel L zwischen den beiden Stationen und das künstliche Kabel, welches aus dem Widerstand W_1, der Selbstinduktion S_1 und der Kapazität C_1 besteht, und welches zur Erde E_1 abgeleitet ist. Da auch die Leitung L an der zweiten Station zur Erde geht, so bleibt der eigene Apparat R_1 in Ruhe, wenn die Verhältnisse der Widerstände, Selbstinduktionen und Kapazitäten in L und dem künstlichen Kabel gleich dem Verhältnis der Widerstände in b_1 und a_1 sind. Der an der entfernten Station ankommende Strom geht dort durch das Relais R_2 zur Erde, der entfernte Apparat wird also jedesmal in Tätigkeit versetzt.

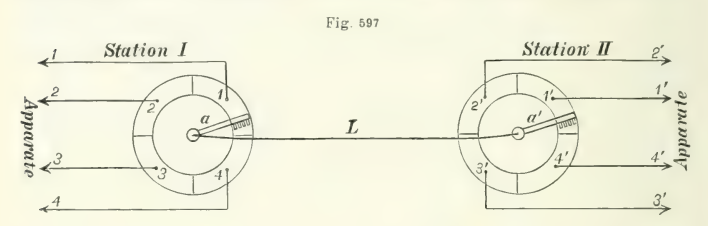
Derartige Schaltungen sind vielfach auf langen Landleitungen, hauptsächlich aber bei Kabeln in Gebrauch, weil durch das gleichzeitige Sprechen und Gegensprechen natürlich in der gleichen Zeit doppelt so viel Buchstaben durch die Leitung gesendet werden können, die Leitung also besser ausgenutzt wird.

Eine noch größere Ausnutzung der Leitungen würde man erzielen können, wenn es gelänge, nicht bloß eine Depesche von jeder Seite aus gleichzeitig durch die Leitung zu senden, sondern wenn man dieselbe Leitung an jeder Seite mit zwei oder mehr Telegraphenapparaten in Verbindung setzen könnte, so daß man gleichzeitig 2, 3, 4 u. s. w. Telegramme in jeder von beiden Richtungen durch dieselbe Leitung hindurchsenden könnte. Dieses Problem nennt man das des Vielfachsprechens.

Auch diese Aufgabe ist sehr vollkommen gelöst durch ein Prinzip, welches, wenn man es sich einmal klargemacht hat, fast selbstverständlich erscheint. Mit besonderen Schaltungen, wie beim einfachen Gegensprechen, kommt man höchstens auf 2 gleichzeitige Telegramme in jeder Richtung (das sogenannte Doppelgegensprechen) und die Schaltung wird dabei schon recht kompliziert. Viel weiter ist man aber auf folgende Weise gelangt. Zum Geben jedes Zeichens braucht ein Telegraphist etwas Zeit. Von dem Moment an, wo ein Zeichen gegeben wurde, bis zu dem Moment, wo das nächste Zeichen gegeben wird, ist daher die Leitung unbenutzt. Man kann nun in dieser Zwischenzeit die Leitung an ein anderes Apparatpaar, Geber und Empfänger, anlegen und kann also in der Zwischenzeit zwischen diesem zweiten Apparatpaar Telegramme senden und eventuell kann man noch in der Zwischenzeit ein drittes und ein viertes Apparatpaar verbinden. Dieses ist das neue Prinzip, das man für den besprochenen Zweck anwendet. Hier besteht aber nicht in strengem Sinne eine gleichzeitige Telegraphie auf demselben Draht, sondern vielmehr eine absatzweise Telegraphie. Aber den Hauptzweck, die Ausnutzung der Leitungen, erreicht diese Art der Mehrfachtelegraphie vollkommener als die wirklich gleichzeitige Telegraphie. Von den Apparaten dieser Art ist der am meisten benutzte der Baudottelegraph, der z. B. zwischen Paris und Berlin in beständigem Gebrauch ist und der auch auf anderen von Paris ausgehenden langen oberirdischen Leitungen be-

nutzt wird. Bei diesem können gleichzeitig zwei, drei, vier oder mehr Gebe- und Empfangsapparate auf beiden Stationen mit derselben Leitung verbunden werden und es können einige dieser Apparate von Station I nach Station II sprechen, andere von Station II nach Station I. Der Baudotsche Telegraph gibt die Zeichen gleich in Druckschrift wieder, er ist also ein Typendrucker. Der Hauptapparat für die absatzweise Telegraphie ist der Verteiler. Auf den beiden Stationen rotiert synchron je ein Apparat, der Verteiler, welcher der Reihe nach die 4 (oder mehr oder weniger) Apparate der einen Station mit der Leitung und mit den entsprechenden Apparaten der zweiten Station in Verbindung setzt. In Fig. 597 ist das Schema eines solchen Verteilers für 4 Apparate gezeichnet. Man sieht auf jeder der beiden Stationen eine Scheibe, welche in 4 Quadranten geteilt ist. Jeder Quadrant ist mit einem Telegraphenapparat verbunden und zwar, je nach Bedarf, mit dem Empfänger oder mit dem Sender. Die gleich bezeichneten Quadranten beider Stationen entsprechen einander. Auf jeder Scheibe rotiert nun ein Arm und zwar auf beiden Stationen syn-

Fig. 597



chron, welcher der Reihe nach die 4 Quadranten berührt. Die beiden Arme sind mit der Leitung verbunden. Es wird daher bei jeder Umdrehung erst Apparat 1 mit 1′, dann 2 mit 2′ u. s. w. leitend verbunden. Da die Achse des Verteilers in jeder Sekunde 3 Umdrehungen macht, so kommt jedes der 4 Apparatpaare in jeder Sekunde 3mal zum Telegraphieren. Ein Taktschläger zeigt dem Telegraphisten jedes Apparates an, wann er wieder ein Zeichen geben kann. Die Zeichengebung bei dem Baudotapparat ist nun in der Weise eingerichtet, daß jeder Buchstabe durch fünf Zeichen gebildet wird, die rasch hintereinander gegeben werden. An jedem Sendeapparat sind 5 Tasten angebracht, die, wenn sie ruhen, von dem negativen Pol, wenn sie gedrückt sind, von dem positiven Pol einer Batterie Strom in die Leitung senden. Zu dem Zweck ist jeder Quadrant des Verteilers wieder in 5 voneinander isolierte Teile geteilt, die mit den 5 Tasten in Verbindung stehen. Der rotierende Arm sendet daher, während er seinen Quadranten bestreicht, fünf kurze Ströme in die Leitung zur entfernten Station, und zwar zum Teil positive, zum Teil negative Ströme. Aus fünf solchen Zeichen lassen sich 31 Kombinationen bilden, nämlich 1 mit 5 positiven Strömen, 5 mit 4 positiven Strömen, je 10 mit 2 und 3, und 5 mit einem positiven Strom. Diese reichen aus zur Bildung der Buchstaben, Zahlen und Zeichen, wenn man das Typenrad in 2 Stellungen bringen kann, so daß es entweder die Buchstaben oder die Zahlen und Zeichen zum Abdruck bringt. Die fünf so in die entfernte Station ge-

sandten kurzen Ströme erregen dort 5 Elektromagnete und die Einrichtung ist so getroffen, daß durch eine Lokalbatterie diese Elektromagnete in derselben Weise erregt bleiben, auch wenn die kurzen Ströme abgelaufen sind. Jeder Elektromagnet wirkt nun auf einen von fünf Hebeln, die miteinander in entsprechender Weise verbunden sind, und so erhalten die fünf Hebel für jede Kombination der Ströme eine ganz bestimmte Stellung. Jeder solchen Stellung entspricht aber auf einem Rad eine bestimmte Kombination von Einkerbungen, und wenn die fünf Hebel bei der Rotation des Rades auf diese fünf Einkerbungen zu liegen kommen, so wird gerade derjenige Buchstabe in bekannter Weise abgedruckt, der der gegebenen Stromkombination entspricht. Auf diese Weise wird also selbsttätig bei jedem Umlauf der Verteilerachsen auf jeden der 4 Empfänger der von den betreffenden Sendern telegraphierte Buchstabe gedruckt. Es könnten also, da, wie gesagt, die Verteilerachse in 1 Sekunde 3 Umdrehungen macht, auf jedem Apparat etwa 180 Buchstaben in der Minute gedruckt werden, auf allen also 720 Buchstaben pro Minute durch dieselbe Leitung übertragen werden. In Wirklichkeit depeschiert man etwa 400 Buchstaben bei einem vierfachen Baudot pro Minute, bei einem achtfachen 800.

Die angeführten Mittel des Gegensprechens und Vielfachsprechens erlauben also eine weitgehende Ausnutzung der Leitungen und sie entsprechen im allgemeinen bis jetzt denjenigen Bedürfnissen, welche sich bei der Ausdehnung des telegraphischen Verkehrs geltend gemacht haben.

In manchen Fällen aber verlangt der Verkehr noch größere Schnelligkeit. Immer mehr hat namentlich der Betrieb großer Zeitungen das Bedürfnis nach sehr langen Depeschen erzeugt. Parlamentsreden, andere große Volksreden sollen von den großen Zeitungen möglichst umgehend und möglichst vollständig telegraphisch gebracht werden. Wenn ein solcher Parlamentsbericht aus 50 000 Worten, jedes durchschnittlich zu 6 Buchstaben, besteht, so braucht man für diese 300 000 Buchstaben bei einem einfachen Hughesapparat, der 125 Buchstaben in der Minute depeschiert, 40 Stunden zur Übermittelung und bei einem vierfachen Baudot, der aber nicht überall aufgestellt ist, noch immer zirka 12 Stunden. Das ist natürlich viel zu viel und für solche Fälle sind also Einrichtungen ein Bedürfnis, welche viel rascher zu telegraphieren gestatten.

Schon Wheatstone hatte dieses Bedürfnis vorhergesehen, obwohl es zu seiner Zeit wohl weniger dringend war, und hat eine praktische Methode zu seiner Befriedigung angegeben. Die Hand des Telegraphisten kann die Morsezeichen nicht beliebig rasch geben. Wenn man aber vorher auf einen Papierstreifen die Depesche in Form von Löchern einschlägt, eine Lochkombination für den Punkt, eine andere für den Strich und eine dritte für den Zwischenraum, so kann man diesen Papierstreifen mit beliebiger Geschwindigkeit durch eine Kontaktvorrichtung ziehen, die dann je nach der Art der Löcher die Ströme für Punkt, Strich oder Zwischenraum gibt, und kann so die Geschwindigkeit des Telegraphierens beliebig erhöhen, weil eben die Depesche nicht mit der Hand, sondern automatisch gegeben wird. Bequeme Einrichtungen zum Durchlochen des Papierstreifens, ferner für die Kontaktvorrichtung

und für den Empfänger, der auf sehr rasch hintereinander folgende Zeichen exakt reagieren muß, hat Wheatstone angegeben. Das Herstellen der durchlochten Papierstreifen kann bei einer sehr langen Depesche natürlich von mehreren Personen geschehen, indem die eine am Anfang, die anderen irgendwo in der Mitte beginnen, so daß das Durchlochen und Telegraphieren sehr kurze Zeit in Anspruch nimmt. Fig. 598 zeigt einen solchen durchlochten Streifen. Die Löcher in der Mitte dienen zur Fortbewegung des Streifens und geben zugleich einen Zwischenraum an. Zwei übereinander stehende Löcher oben und unten bedeuten einen Punkt, zwei schräg gegeneinander stehende, oben links und unten rechts, bedeuten einen Strich.

Fig. 598.

M A N N H E I M

Mittels der Wheatstoneschen automatischen Telegraphie kann man etwa 250 Buchstaben pro Minute befördern, bei dem ähnlichen System von Murray sogar zirka 350 in der Minute direkt in Druckschrift auf der Empfangsstation aufschreiben lassen.

Natürlich ließe sich mit einem solchen gelochten Papierstreifen die Geschwindigkeit des Gebens noch bedeutend erhöhen; man brauchte eben den Papierstreifen bloß rascher durch die Kontaktvorrichtung zu ziehen und zu bewirken, daß diese richtig Kontakt macht, was nicht zu schwer ist. Aber eine Grenze ist der Geschwindigkeit durch den Empfangsapparat gesetzt. Dieser muß die Morsezeichen richtig und kräftig angeben und dazu ist jedesmal eine gewisse Zeit nötig. Denn es muß durch die einzelnen Ströme ein Magnet erregt werden und wieder abklingen, es muß ein Anker angezogen und losgelassen, irgend ein Hebel zum Schreiben der Zeichen bewegt werden und das erfordert eine, wenn auch minimale Zeit. Diese Zwischenzeit muß also zwischen zwei Zeichen bleiben, weiter läßt sich mit solchen Empfangsapparaten die Geschwindigkeit nicht treiben.

Es sind aber doch in den letzten Jahren einige Systeme der *Schnelltelegraphie* ausgearbeitet worden, welche die Geschwindigkeit des Telegraphierens ganz außerordentlich steigerten, so daß man mit ihnen 2000 bis 3000 Buchstaben pro Minute telegraphieren kann, eine ganz enorme Leistung. Diese Erhöhung der Leistung wird dadurch erzielt, daß die *Photographie* in den Dienst der Telegraphie gestellt wird. Bei dem einen System, dem von *Pollak* und *Virag*, wird ein Lichtstrahl auf einen Spiegel geworfen, der durch die ankommenden Ströme in äußerst geringe Bewegungen versetzt wird. Der reflektierte Lichtstrahl zeichnet auf einen photographischen Film die Bewegungen des Spiegels auf und gibt die Depesche sofort annähernd in Kursivschrift wieder. Bei dem System von *Siemens & Halske* bewirken die ankommenden Ströme die Entladung eines geladenen Kondensators durch einen Funken gerade in dem Moment, wo der zu telegraphierende Buchstabe, der durchsichtig auf einer rotierenden Scheibe angebracht ist, sich zwischen dem Funken und einem photographischen Film befindet. Durch den Funken wird daher der Buchstabe und so die ganze Depesche photographiert. Wenn auch bisher die Schnelltelegraphen nur in Ausnahmefällen von erheblicher Bedeutung sind, so wird

doch ihre Wichtigkeit allmählich eine immer größere werden, da das öffentliche Leben sich in der ganzen Welt immer mehr entwickelt und das Interesse, über alle Vorgänge rasch und ausführlich berichtet zu werden, immer mehr wächst.

Einer ganz anderen Anwendung des Telegraphen hat man stets ein allgemeines neugieriges Interesse entgegengebracht, obwohl die praktische Bedeutung dieser Anwendung eine minimale ist. Es handelt sich um die Frage, ob man nicht die eigene Schrift des Absenders oder auch ganze Zeichnungen oder Photographieen telegraphisch nach einer entfernten Station übermitteln könne.

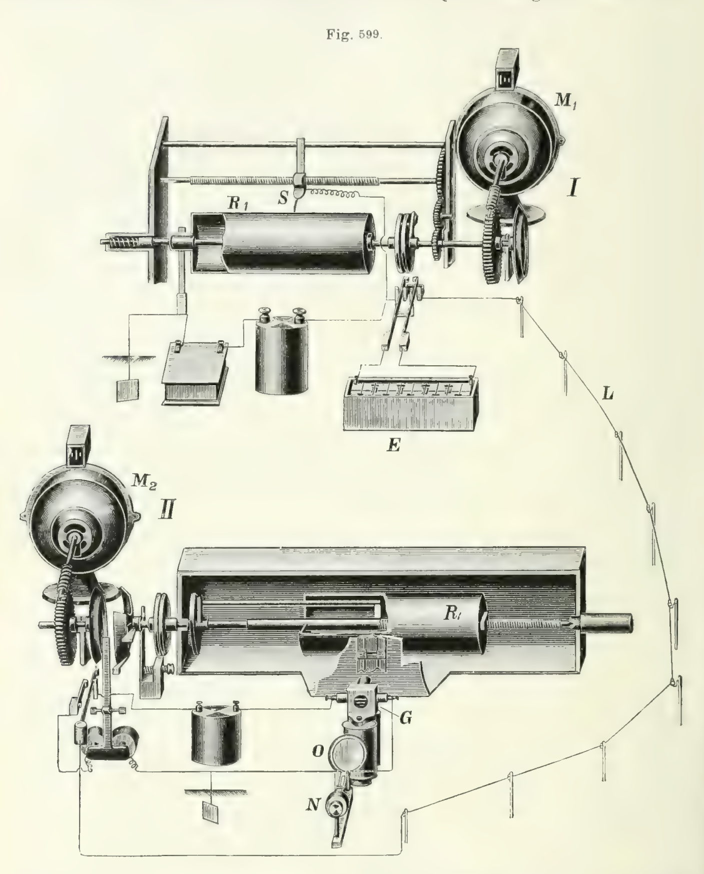
Das erstere kann im kaufmännischen Leben manche Anwendungen erfahren, das letztere kann namentlich im Dienste der Polizei zur Abtelegraphierung der Photographie von flüchtigen Verbrechern wertvoll sein. Auch für illustrierte Zeitschriften kann unter Umständen eine telegraphische Photographie von Interesse sein, namentlich solange man mit ihr Reklame machen kann.

Es ist prinzipiell nicht schwer, Einrichtungen für diesen Zweck zu treffen, aber eine einigermaßen erhebliche praktische Bedeutung haben sie nicht gewonnen. Man nennt derartige Telegraphen Kopiertelegraphen oder Telautographen. Prinzipiell gehen die heute hier und da benutzten derartigen Telegraphen zurück auf eine Anordnung, welche schon vor langer Zeit von Caselli in seinem Pantelegraphen angegeben und benutzt wurde. Caselli bediente sich der chemischen Wirkungen des Stromes. Auf jeder der beiden Stationen befindet sich eine Metallplatte. In der Aufgabestation wurde die Depesche mit einer nichtleitenden Harzlösung auf die Platte geschrieben, auf der Empfangsstation lag ein mit Blutlaugensalzlösung getränktes Papier auf der Metallplatte. In beiden Stationen wurden zwei Stifte durch ein Uhrwerk vollkommen synchron in Bewegung gesetzt, so daß sie nahe aneinander liegende, parallele Striche auf den Platten machen. Solange der Stift auf der ersten Station das leitende Metall berührt, geht ein Strom von der Batterie durch die Leitung zu dem Stift der zweiten Station und zersetzt dort das Blutlaugensalz, aus welchem sich Berlinerblau bildet, so daß auf dem dortigen Papierblatte blaue Striche erscheinen. Sobald aber der Stift der ersten Station über den nichtleitenden Buchstaben sich bewegt, fließt kein Strom durch die Leitung und das Papier der zweiten Station bleibt infolgedessen weiß. Man erhält daher auf der Empfangsstation die Depeschen in weißer Schrift auf blauem Grunde. Die Stifte beider Apparate müssen sich durchaus synchron bewegen, was man heute mit großer Sicherheit bewirken kann. Ein solcher Telegraph war zwischen Paris und Lyon zum allgemeinen Gebrauch aufgestellt, wurde aber wieder abgeschafft, weil die Benutzung desselben zu gering war.

Von den neueren Anordnungen sei hier die Kornsche Telautographie erwähnt, die durch Fig. 599 dargestellt ist. In dieser bedeutet I die Sendestation, II die Empfangsstation, die durch die Leitung L verbunden sind. Die Apparate beider Stationen werden durch Elektromotoren M_1 und M_2 in Rotation versetzt und es sind Einrichtungen getroffen, daß diese Bewegungen synchron sind und bleiben. Die zu übertragende Schrift oder Zeichnung wird durch das Chromgelatineverfahren auf eine Metallfolie

übertragen, wobei die hellen Teile aus nichtleitender Gelatine auf dem Metall bestehen, die eingebrannt werden, während die dunklen Teile der Schrift oder Zeichnung das Metall der Folie nicht verändern. Die Metallfolie wird auf die rotierende Walze R gelegt und während die Walze sich dreht, wird sie von dem Stift S berührt, der sich dabei zugleich längs der Walze ver-

Fig. 599.



schiebt. Von der Batterie E ist der eine Pol mit dem Stift S verbunden und der Strom geht durch S und die Metallwalze zur Erde, während der andere Pol der Batterie mit der Leitung L zur entfernten Station verbunden ist. (Es sind hierbei bloß die Hauptapparate der Figur besprochen.) An der Empfangsstation sollen nun die einzelnen Ströme Belichtungen

einer photographischen Platte, die selbst rotiert, hervorbringen, bei den Stromunterbrechungen soll die Platte nicht belichtet werden, oder umgekehrt. Der photographische Film befindet sich auf der rotierenden Walze R_1 und von einer Nernstlampe wird durch ein photographisches Objektiv O ein Lichtpunkt auf der Platte erzeugt, der bei der Drehung und gleichzeitigen Vorschiebung der Walze Spiralen auf der Platte beschreibt, außer wo er durch die Stromunterbrechungen abgeblendet wird. Dazu dient das sogenannte Lichtrelais G. Dasselbe besteht aus einem Saitengalvanometer (S. 199), an dessen Faden ein undurchsichtiges Blättchen befestigt ist. Kommt der Strom von der Sendestation in das Saitengalvanometer, so wird das Blättchen gedreht und läßt die Öffnung für das Licht der Nernstlampe frei. Fließt kein Strom, so verschließt das Blättchen die Öffnung. Auf diese Weise werden die leitenden Stellen im Geber, also die schwarzen Stellen, durch schwarze Stellen im Empfänger abgebildet.

Bei der Kornschen Fernübertragung von Photographieen, bei der es auch auf die verschiedene Helligkeit der schwarzweißen Stellen ankommt, wird in dem Sendeapparat die Eigenschaft des Selens benutzt, seine Leitungsfähigkeit bei Belichtung zu ändern.

Außer für die Zwecke der eigentlichen Telegraphie hat die große Schnelligkeit, mit welcher man auf elektrischem Wege Signale fortpflanzen und Bewegungen auslösen kann, zu einer großen Reihe von Verwendungen der Telegraphen zu verschiedenen Zwecken geführt. Insbesondere hat der Eisenbahnbetrieb die Telegraphie zu den allerverschiedensten Leistungen benutzt, teilweise um Signale zu geben, teilweise aber auch, um zur bestimmten Zeit selbsttätig gewisse Vorrichtungen vornehmen zu lassen. Auch bei großen Schiffen werden die Kommandos von der Kommandobrücke durchgängig auf elektrischem Wege den betreffenden Untergebenen übermittelt. Doch liegen diese unzähligen Anwendungen nicht im Rahmen dieses Werkes.

---

14. Kapitel.

Telephon und Mikrophon.

Konnte die Telegraphie auch lange das Bedürfnis des Verkehrs befriedigen, indem sie es gestattete, Mitteilungen jeder Art rasch zwischen zwei beliebig voneinander entfernten Personen zu übertragen, so brauchte sie dazu doch immer Vermittler, welche die Worte in telegraphische Zeichen und diese wieder in Worte umsetzten. Auch diese Beschränkung fiel durch die Erfindung des Telephons, welches die Worte selbst in die Ferne zu tragen, also ein Fernsprechen und Fernhören gestattet.

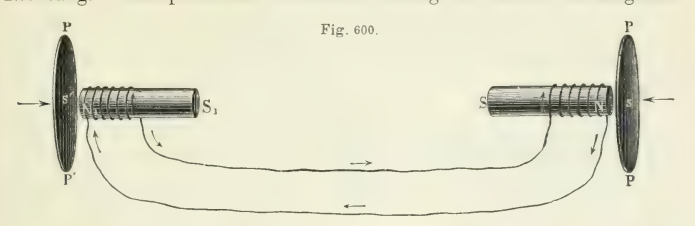
Das Telephon in der Gestalt, wie es sich in kurzer Zeit einen Platz unter den wichtigsten Verkehrsmitteln der Menschheit errungen hat, ist einer der genialsten Apparate, den die Physik kennt, um so genialer, da er in überaus einfacher Weise konstruiert ist und Naturgesetze benutzt, die alle längst bekannt und angewendet waren. Es ist ein Amerikaner, Graham Bell, dem wir die Erfindung des Telephons verdanken. Zwar waren schon früher Versuche gemacht worden, Töne vermittels der Elektrizität in die Ferne zu senden, insbesondere hat Philipp Reis 1860 ein Telephon konstruiert, durch welches auch bereits Worte und Töne elektrisch übermittelt werden konnten, aber einen praktischen Erfolg erlangte dieses Unternehmen erst durch die einfache Konstruktion von Bell.

Die Aufgabe war, Töne und Worte elektrisch auf größere Entfernungen zu übertragen. Töne sind ja nichts anderes als Schwingungen des tönenden Körpers, also eine bestimmte Art von Bewegung. Die Aufgabe, Töne zu übertragen, ist also ein spezieller Fall der Aufgabe, durch elektrische Mittel Bewegungen zu übertragen. Es soll an einer Stelle, an einer Station ein Körper in schwingende Bewegung versetzt werden, diese Bewegung soll elektrische Ströme erzeugen, welche nach der anderen Station fortgepflanzt werden, und dort sollen diese Ströme wieder gleichartige schwingende Bewegungen, Töne hervorbringen, die elektrische Energie soll sich wieder in Bewegungsenergie umsetzen.

Die Art und Weise, wie Bell dieses Problem mit den einfachsten Mitteln gelöst hat, haben wir bereits einmal auf S. 223 im Prinzip kennen gelernt. An jeder der beiden Stationen befindet sich ein mit einer Drahtspule umwickelter Stahlmagnet (Fig. 600). Die beiden Drahtspulen sind miteinander zu einem geschlossenen Kreis verbunden. Vor jedem dieser permanenten Magnete befindet sich in geringer Entfernung eine dünne Platte aus weichem Eisen, welche an ihrem Rande befestigt ist. Diese Platten werden durch die Nähe des Magneten selbst temporär magnetisch. Sobald nun die eine Eisenplatte etwas zu ihrem Magneten hingebogen wird, wirkt ihr Magnetismus auf die Umwindungsspule des

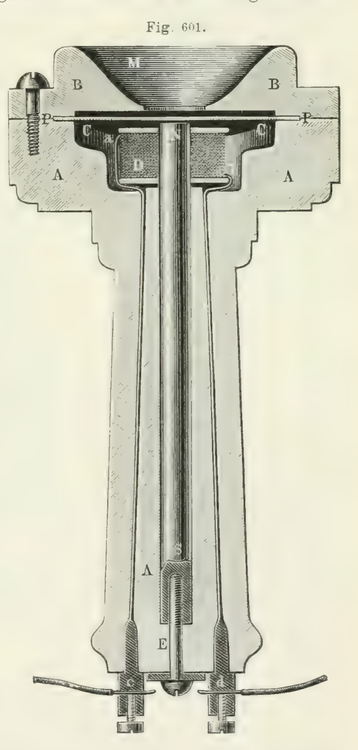
Magneten und erzeugt in dieser einen Induktionsstrom in einer bestimmten Richtung. Dieser pflanzt sich durch die Leitung fort bis zu dem Magneten

Fig. 600.



der zweiten Station, umfließt diesen in passender Richtung und verstärkt dadurch dessen Magnetismus. Infolgedessen zieht der stärker gewordene Magnet dort die vor ihm stehende Eisenplatte an, diese biegt sich auch gegen den Magneten hin, macht also dieselbe Bewegung wie die Platte der ersten Station. Dasselbe findet statt, wenn die erste Eisenplatte von ihrem Magneten etwas entfernt wird. Dann entfernt sich infolge des entstehenden Induktionsstromes auch die zweite Eisenplatte von ihrem Magneten. Macht also die erste Eisenplatte Schwingungen hin und her, so macht die zweite Eisenplatte genau dieselben Schwingungen.

Fig. 601.



Ganz nach diesem Schema ist das Telephon von Graham Bell eingerichtet, welches in Fig. 601 abgebildet ist. In einem Holzgehäuse befindet sich ein Magnetstab N S, dessen Nordpol von einer Drahtspirale D aus sehr feinem, dünnem Draht umgeben ist. Die Enden dieser Drahtspirale führen in die Klemmen c und d. Dicht über ihm, aber ohne ihn zu berühren, befindet sich die dünne Platte C aus weichem Eisen, welche mit ihren Rändern in dem Holzgehäuse bei P P befestigt ist. Der Deckel hat eine Öffnung, durch welche die Mitte der Eisenplatte frei liegt, so daß man an sie heransprechen und singen kann. Jeder Ton versetzt die Platte in schwingende Bewegung und diese pflanzt sich auf elektrischem Wege durch die Drahtleitung zur ent-

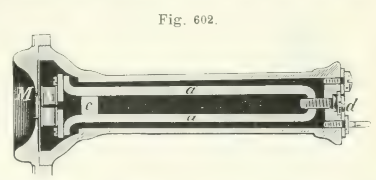
fernten Station fort, wo sie dieselben Schwingungen, denselben Ton hervorbringt.

Bei einem jeden Ton haben wir drei Elemente zu unterscheiden: die Tonhöhe, die Tonstärke und die Klangfarbe. Die Höhe und die Stärke eines Tones müssen sich nun ohne weiteres durch das Telephon fortpflanzen lassen. Denn die Tonhöhe ist die Anzahl der hin und her gehenden Bewegungen der Platte in einer Sekunde. Eine jede solche Bewegung erzeugt einen entsprechenden Strom, und die Anzahl der Induktionsströme ist genau gleich der Anzahl der Schwingungen des Tons. Die Stärke des in das Telephon hineingesungenen oder hineingesprochenen Tones beeinflußt die Stärke der Durchbiegung der Eisenplatte. Durch einen stärkeren Ton wird die Eisenplatte kräftiger und weiter an den Magneten herangedrückt oder von ihm entfernt, und infolgedessen werden auch die Induktionsströme stärker. Das Telephon folgt daher auch genau jeder Veränderung in der Tonstärke der hineingesprochenen Töne. Ja es leistet noch mehr. Das dritte Element, welches einen jeden Klang charakterisiert, ist seine Farbe, die Klangfarbe (Timbre). Die menschliche Stimme hat einen anderen Klang, eine andere Klangfarbe als eine Violine oder eine Trompete. Der Unterschied dieser Klangfarben beruht nach den berühmten Untersuchungen von Helmholtz darauf, daß in einem Klang nicht bloß eine einzige Art von Schwingungen vorhanden ist, nicht bloß eine Bewegung mit einer bestimmten Schwingungszahl, sondern daß in einem Klang außer einem Grundton zugleich noch eine ganze Reihe von anderen Schwingungen enthalten ist, deren Schwingungszahlen ganze Vielfache des Grundtones sind. Die Tonhöhe eines Klanges ist durch die Schwingungszahl des Grundtones bestimmt. Außerdem vollführt aber jedes Teilchen noch eine Menge von Schwingungen mit anderen Schwingungszahlen, die Helmholtz Obertöne nennt, und diese bringen eben die Farbe der Klänge hervor. Es können in einem Klang viele dieser Obertöne vorhanden sein, in einem anderen weniger, es können aus der Reihe der Obertöne einige fehlen, einige verhältnismäßig stärker sein als die anderen, alles dieses bringt die verschiedene Färbung der Klänge hervor. Alle diese Umstände müssen sich aber auch bei der telephonischen Übertragung des Schalles erhalten. Denn wenn ein Teilchen in komplizierter Weise hin und her schwingt, mit bald größerem, bald geringerem Ausschlag, bald rascher, bald langsamer, so werden ganz analog dieser Schwingungsart auch die elektrischen Ströme in gleicher Weise verändert, und daher muß die Eisenplatte des zweiten Telephons auf der Empfangsstation in ganz gleicher Weise komplizierte Schwingungen machen. Die Schwingungen dieser Eisenplatte teilen sich dann der umgebenden Luft mit, und so muß man an der Empfangsstation die Töne und Worte in gleicher Tonhöhe, gleicher Klangfarbe und entsprechender Stärke hören.

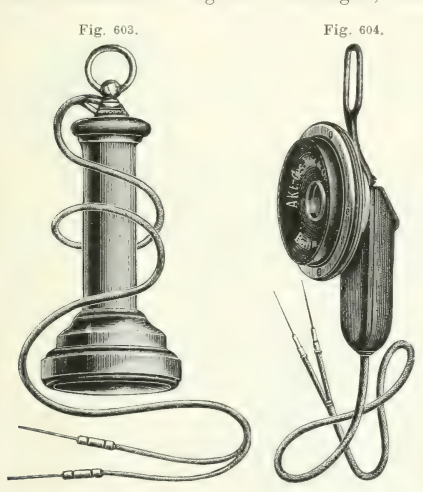
In entsprechender Stärke. Denn die Stärke des an der Empfangsstation wiedergegebenen Tones muß notwendigerweise eine viel geringere sein als die Stärke des an der Aufgabestation hineingesprochenen Tones. Die Bewegungsenergie der Luftteilchen, welche in Schwingungen versetzt sind, muß sich ja zuerst der Eisenplatte mitteilen, wodurch schon ein großer Teil von ihr verloren geht. Durch die Umsetzung der mechanischen

Energie in elektrische geht wieder ein Teil verloren und durch die Rückumsetzung der elektrischen Energie in Bewegungsenergie tritt ein neuer Verlust ein. Daher ist es klar, daß der nach vielen Umsetzungen erzeugte Schall auf der zweiten Station viel geringere Stärke haben muß als der aufgegebene, wenn man nicht besondere Hilfsmittel anwendet, um ihn zu verstärken.

Fig. 602.



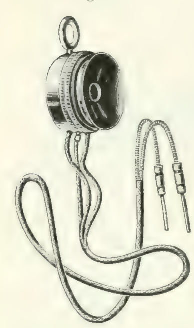
Trotz dieser vielen Verluste läßt sich aber doch mit dem einfachen Bellschen Telephon Stimme und Sprache sehr vernehmlich übertragen. An der Aufgabe- und Empfangsstation sind dabei die Telephone ganz gleich eingerichtet. Ein jedes dient zugleich als Tonsender und als Tonempfänger. Je größer der Abstand zwischen beiden Stationen ist, desto größer ist der Widerstand der Drahtleitung, desto geringer wird also die Stromstärke und desto geringer die Wirkung des Telephons. Es läßt sich deshalb das Bellsche Verfahren nur für kurze Strecken, einige hundert Meter weit, benutzen. Nichtsdestoweniger hatte das Bellsche Telephon unwiderleglich die Möglichkeit bewiesen, den Schall auf elektrischem Wege zu übertragen, und es kam jetzt nur noch darauf an, die Wirkungen zu verstärken. Ein sehr naheliegendes Mittel dazu besteht darin, daß man in dem Gehäuse des Telephons nicht einen Stabmagneten, sondern einen kräftigen Hufeisenmagneten anbringt, wie in Fig. 602. Die Pole desselben sind mit Polschuhen versehen, die ganz eng aneinander stehen und je mit einer Drahtspule b b so umwickelt werden, daß die in ihnen gleichzeitig erzeugten entgegengesetzten Ströme sich gegenseitig verstärken. Der Hufeisenmagnet ist unten an einer feinen Schraube d befestigt, durch welche er der Eisenplatte genähert oder von ihr entfernt werden kann, damit man die möglichst größte Wirkung erhält. Die äußere Ansicht eines solchen Telephons mit den Leitungsschnüren zeigt Fig. 603.



Man kann dem Hufeisen zweckmäßig noch andere Formen geben, namentlich, um es bequem fassen zu können. So werden bei dem Löffeltelephon (Fig. 604) die Polschuhe mit den Drahtrollen senkrecht

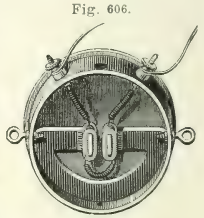
zum Hufeisen gesetzt, so daß Membran und Hörmuschel parallel zum Griff sind. Bei dem Dosentelephon (Fig. 605) ist der halbkreisförmige Hufeisenmagnet in einer Dose untergebracht und seine Polschuhe stehen senkrecht auf ihm, gegen den Deckel der Dose zu, wie man aus Fig. 606 sieht, welche die Dose geöffnet zeigt. Um die Sprache laut im Zimmer zu vernehmen, ohne das Ohr an das Telephon zu halten, bringt man einen Schalltrichter am Telephon an. So zeigt Fig. 607 ein derartiges sogenanntes Stentortelephon von Mix & Genest in Berlin. Das Telephon selbst ist in dem Kästchen befestigt.

Fig. 605.



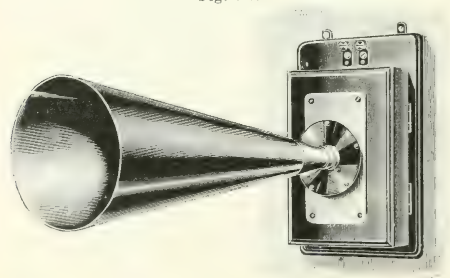
Bei der ersten Einführung des Telephons hatte man in der Tat für das Sprechen sowohl wie für das Hören zwei ganz gleich eingerichtete Apparate. Die durch die Induktionswirkung in dem einen Telephon erzeugten Ströme dienten ganz direkt dazu, um das zweite Telephon in Tätigkeit zu setzen. Man braucht keine besondere Batterie, um mit solchen Telephonen zu sprechen, sondern man erzeugt die Ströme durch das Sprechen selbst. Die Schallenergie, die man dabei in das erste Telephon hineingibt, setzt sich in elektrische Energie um, und diese wird schließlich wieder zu Schallenergie. Die Verluste an Energie, die auf diesem Wege entstehen, müssen aber notwendig den Schall an der zweiten Station erheblich schwächen.

Fig. 606.



Aber die Wirkungsweise des Telephons als Sprechapparat verlangt ja im Grunde weiter nichts, als daß durch die hineingegebenen Töne periodische Schwankungen in der Stromstärke eintreten, welche dann von dem Telephon als Hörapparat wieder in periodische Bewegungen umgesetzt werden. Bei dem einfachen Telephon als Sprechapparat werden aber durch die hineingesprochenen Worte nicht bloß Änderungen in der Stromstärke erzeugt, sondern die Ströme werden selbst erst dadurch hervorgebracht. Es ist das offenbar überflüssig. Wenn man von vornherein einen Strom hat, z. B. durch ein galvanisches Element erzeugt, so braucht man durch die Worte und Töne nur Schwankungen in der Stromstärke hervorzurufen, und kann dann diese durch ein

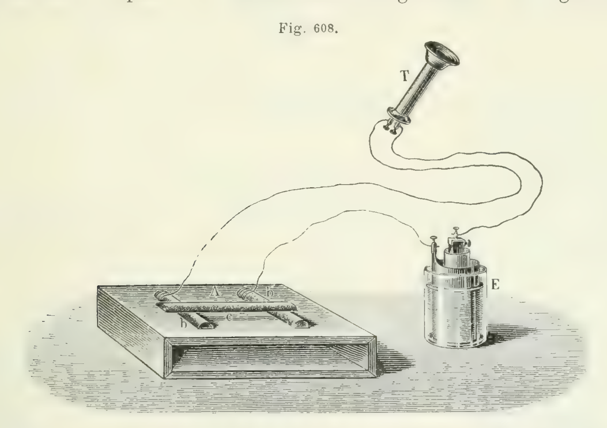
Fig. 607.



Hörtelephon wieder in Worte umsetzen. Dies war die neue Idee, die dem von Hughes erfundenen Mikrophon zu Grunde liegt. Die periodischen Stromschwankungen bringt nämlich Hughes durch Anwendung von variablen Kontakten an Kohlenstäben hervor.

Die Kohle hat, wie wir wissen, einen sehr erheblichen Leitungswiderstand. Wir wissen aber auch (S. 85), daß dieser Widerstand sich durch Druck sehr erheblich ändert. Die Idee von Hughes bestand nun darin, durch die Schallbewegungen zwei Kohlenstäbchen, die sich gerade eben berühren und durch die ein Strom hindurchgeht, in engere und weniger enge Berührung miteinander zu bringen und so den Widerstand derselben und dadurch die Stromstärke in dem Stromkreis in erhebliche Schwankungen zu versetzen. Man kann sehr leicht zeigen, daß man durch ganz geringe Veränderungen des Druckes zweier Kohlen aufeinander sehr erhebliche Stromschwankungen bekommt, und daß man dadurch ein Telephon zum lauten Tönen bringen kann. In Fig. 608 ist

Fig. 608.

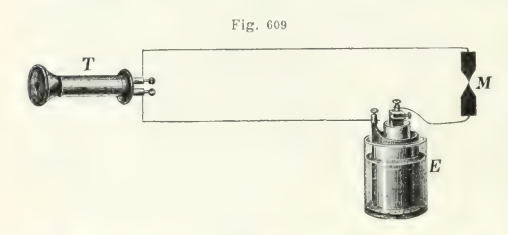


eine Vorrichtung dazu abgebildet. Von einem Element E geht ein Strom durch eine Kohle b, dann durch die leise darauf gelegte Kohle c zu der anderen Kohle b, durchläuft dann die Windungen des Telephons und kommt zum Element zurück. Solange das Kohlenstäbchen c ganz ruhig auf b liegt, hört man natürlich nichts, weil ja die Stromstärke unverändert bleibt. Die leiseste Bewegung von c aber, z. B. schon eine Bewegung, die dadurch hervorgebracht wird, daß eine Fliege auf dem Kästchen A geht, bringt sofort ganz erhebliche Stromschwankungen hervor, und infolgedessen wird der Magnet des Telephons verstärkt und geschwächt und man hört im Telephon ein lautes Geräusch. Diesen Apparat, ein paar lose sich berührende Kohlen, auf einer Schallmembran befestigt, nennt man ein Mikrophon.

Hier hat man also ein einfaches Mittel, um in einem Telephon ganz erhebliche Stromschwankungen hervorzubringen. Natürlich kann dabei das Mikrophon in der einen Station, das Telephon in der anderen sein.

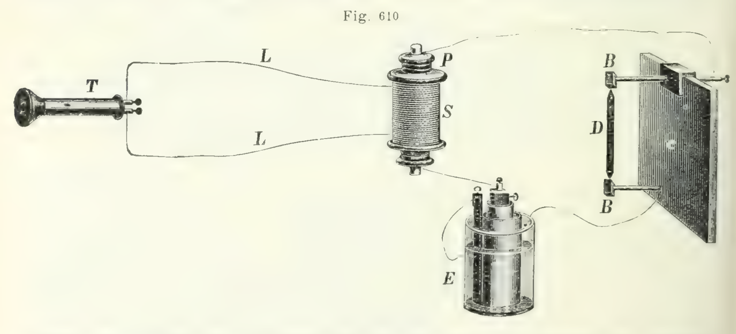
Der Unterschied dieser Hughesschen Anordnung von der Bellschen ist also ein doppelter. Bei der Bellschen Telephoneinrichtung werden zwei gleiche Apparate zum Sprechen und Hören benutzt. Der Tonsender oder, wie man auch häufig sagt, der Transmitter und der Tonempfänger sind beide einfache Telephone. Bei der Hughesschen Anordnung dagegen ist der Transmitter nicht ein Telephon, sondern ein Mikrophon. Der zweite Unterschied ist der, daß man bei der Bellschen Anordnung kein galvanisches Element braucht. Durch das Sprechen werden im ersten Telephon Induktionsströme erregt und diese bringen das zweite Telephon in Tätigkeit. Bei der Hughesschen Anordnung dagegen muß das Mikrophon in einem Stromkreis liegen, durch den ein Strom von einem Element fließt. Das Sprechen dient nur dazu, die Stärke dieses schon vorhandenen Stromes in bestimmter Weise zu verstärken und zu schwächen.

Fig. 609



Die Anordnung, wie sie bei dem Hughesschen Mikrophon nötig ist, wäre also eine solche, wie sie in Fig. 609 gezeichnet ist. Der Strom fließt vom Element E der Aufgabestation durch das Mikrophon M derselben Station, dann durch die Leitung zur zweiten Station und direkt durch die Spule des Telephons T dieser Station und von dort durch die Leitung zur ersten Station nach E zurück. Dabei wird also das Telephon der zweiten Station stets von dem Strome durchflossen, der von dem Element E durch die Leitung gesendet wird.

Fig. 610

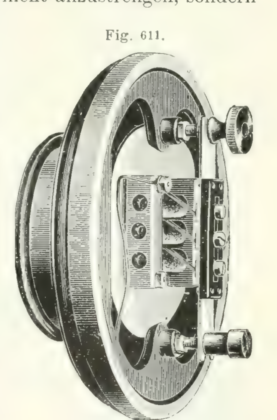


Man kann aber das Telephon der Empfangsstation auch aus diesem Stromkreis entfernen, und diese Anordnung ist für die Schaltung von solchen Apparaten sehr vorteilhaft. Um das zu erreichen, sendet man nicht den veränderlichen Strom des Elements direkt durch die Telephonspirale

sondern vielmehr in die primäre Spule einer Induktionsrolle. Die in der sekundären Spule dieser Induktionsrolle erzeugten Induktionsströme läßt man dann erst durch das Telephon gehen. Bei dieser Einrichtung fließt also (Fig. 610) in der ersten Station der Strom vom Element E durch das Mikrophon BDB und dann einfach durch eine primäre Induktionsspule P in derselben Station hindurch und zum Element zurück. Um die primäre Induktionsspule ist dann, getrennt, eine sekundäre Induktionsspule S gewunden, in welcher die Induktionsströme erregt werden, und diese ist durch eine Leitung L mit dem Telephon T der zweiten Station verbunden. Die in S induzierten Ströme gehen in die entfernte Station und bringen dort das Telephon zum Tönen.

Das erste Mikrophon von Hughes bestand einfach aus einem Resonanzbrettchen, an welchem, wie in Fig. 610, zwei Kohlenstücke angebracht waren. Diese hatten kleine Vertiefungen an zwei Stellen und in diese war ein Kohlenstäbchen lose eingestellt. Sprach man gegen das Resonanzbrettchen, so kamen die Kohlen in entsprechende Vibrationen und in dem Telephon der zweiten Station wurden die Worte gehört. Man brauchte dabei die Stimme beim Sprechen gar nicht anzustrengen, sondern konnte mit gewöhnlicher Stärke aus einiger Entfernung an das Mikrophon heransprechen und doch auf einige Meilen mit Leichtigkeit den Schall übertragen.

Fig. 611.

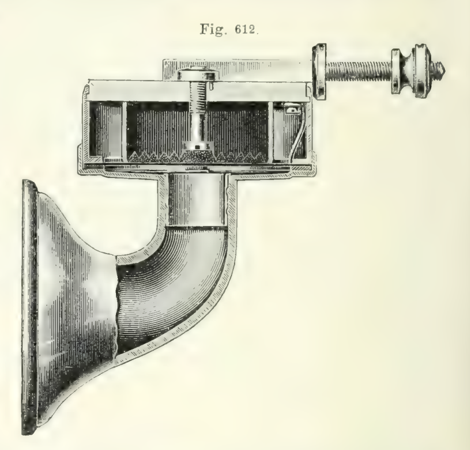


Dieses einfache Kohlenmikrophon von Hughes wurde dann von anderen Konstrukteuren in verschiedenen anderen Formen hergestellt, und insbesondere wendete man und wendet man jetzt statt eines Stäbchens gern deren mehrere an. Ein solches Stäbchenmikrophon ist z. B. das früher von der deutschen Reichspost adoptierte, das in Fig. 611 von der Rückseite abgebildet ist. Dasselbe besteht aus einem runden Kästchen, das vorn durch eine Holzplatte geschlossen ist, auf der ein Mundstück befestigt ist. Innen sind zwei senkrechte Kohlenklötzchen mit je drei Löchern vorhanden, zwischen denen drei bewegliche Kohlenstäbchen liegen. Dieselben sind durch je eine dünne Feder an die Sprechplatte angedrückt. In die beiden Kohlenklötze wird der Strom vom Element eingeführt.

Je mehr bewegliche Berührungspunkte zwischen den Kohlen vorhanden sind, desto größer sind die Stromschwankungen, die man durch das Sprechen erzeugen kann, und desto lauter wird also der übertragene Ton sein, resp. auf desto größere Entfernungen wird man sprechen können. Von diesem Gedanken ausgehend, hat zuerst Hunnings 1878 ein Mikrophon konstruiert, welches aus einer großen Zahl von Kohlenkörnern und zwar aus Koks bestand. Solche Körnermikrophone sind allmählich, weil sie die beste Wirkung ergeben, von verschiedenen Fabriken konstruiert worden und sie haben die älteren Stäbchenmikrophone fast vollständig verdrängt. Das Hauptaugenmerk wurde bei diesen

neuen Konstruktionen darauf gerichtet, die Übelstände zu vermeiden, die bei derartigen Mikrophonen auftreten. Es bilden sich nämlich an den Kontaktstellen der Kohlen allmählich infolge der Erwärmung durch den Strom Zusammenbackungen, die bewirken, daß die Kontakte sich verändern und daß man dann nur schwache Stromschwankungen bekommt. Auf die Güte und Unveränderlichkeit der Kontakte kommt aber alles an.

Fig. 612.



Das zuerst am meisten verbreitete von diesen Körnermikrophonen ist der sogenannte Universaltransmitter von Berliner. Dieses Mikrophon ist in Fig. 612 im Durchschnitt dargestellt. Die Kohlenkörner, aus besonders präparierter Kohle bestehend, befinden sich bei ihm in dem engen Zwischenraum zwischen der Schallmembran, die hier selbst aus Kohle besteht, und der ausgezackten unteren Fläche eines Kohlenblocks. Das ganze System, Kohlenblock und Zwischenraum mit Kohlenkörnern bis zur Membran ist von einem Ring aus weichem Stoff umgeben. Wichtig ist die Lagerung der Kohlenmembran nach unten. Um trotzdem bequem sprechen zu können und die Membran kräftig zu erregen, ist an ihr ein gebogener Schalltrichter aus lackierter Papiermasse befestigt. Dieser Universaltransmitter, dessen äußere Ansicht Fig. 613 zeigt, wird mit vier bis fünf Leclanché-Elementen getrieben und gestattet die Sprache, insbesondere aber auch die Musik, laut und deutlich in einem großen Zimmer zu vernehmen.

Fig. 613.



In ähnlicher Weise sind die Körnermikrophone von Siemens & Halske und von Mix & Genest eingerichtet, die jetzt von der deutschen Reichspost eingeführt sind. Die horizontale Lagerung der Kohlenmembran ist dabei nicht mehr notwendig, da man durch einfaches Drehen des Kästchens, welches das Kohlenpulver enthält, das Zusammenbacken beseitigen kann.

Sobald man ein Mikrophon anwendet, hat man also zum Hören und Sprechen zwei verschiedene Apparate: zum Sprechen das Mikrophon oder den Transmitter, zum Hören das Telephon. Jede von beiden Stationen

muß dann ein Telephon und ein Mikrophon und für das letztere ein Element und ferner ein Paar Induktionsrollen haben. Die Verbindung ist dann derart, daß in jeder Station das Element durch das zugehörige Mikrophon und die primäre Rolle geschlossen ist, während die beiden Telephone und die zugehörigen sekundären Rollen auf beiden Stationen zusammen durch die Leitung verbunden sind. In der Fig. 614 sind die primären Spiralen stark gezeichnet, die sekundären schwach. Die Verbindung ergibt sich dann aus der Figur einfach, in welcher M, M_1 die beiden Mikrophone, E, E_1 die zugehörigen Elemente, T, T_1 die beiden Telephone, S, S_1 und R, R_1 die primären und sekundären Induktionsspulen sind, von denen die letzteren durch die Hin- und Rückleitung L miteinander verbunden sind.

Die Rückleitung jedoch braucht nicht durch einen Draht zu geschehen. Nach der Entdeckung von Steinheil, die im vorigen Kapitel besprochen worden ist, ist es möglich, die Erde selbst als Rückleitung zu benutzen. Man verbindet das eine Ende jeder sekundären Spirale mit der Leitung, das andere mit dem Telephon und durch dieses mit der Erde, und braucht dann nur einen Draht zwischen den beiden Stationen und erspart also an Material und Kosten der Einrichtung. Doch nimmt man jetzt meistenteils auch für die Rückleitung einen eigenen Draht.

Als galvanische Elemente für die Mikrophonkreise nimmt man gewöhnlich Leclanché-Elemente, welche ausreichend stark und ausdauernd und billig sind.

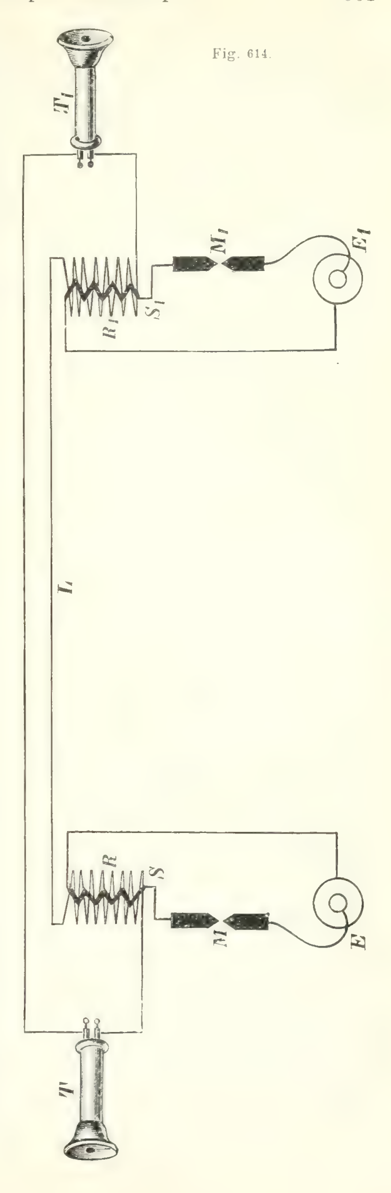


Fig. 614.

Wenn das Telephon und Mikrophon nicht benutzt werden, ist es natürlich angebracht, das Element zu öffnen, damit dasselbe weniger rasch verbraucht wird. Man hat dazu zweckmäßig eine automatische Einrichtung angebracht. Es wird nämlich das Telephon nach Beendigung des Gesprächs einfach an einen Haken gehängt und dadurch der Strom des Mikrophonkreises unterbrochen.

Durch dieselbe Operation stellt man aber noch eine andere Verbindung her, nämlich mit einer elektrischen Klingel, die zuweilen durch eine besondere Batterie, zuweilen aber durch eine kleine magnetelektrische Maschine, deren Anker man durch eine Kurbel dreht, betrieben wird. Man drückt an der Aufgabestation auf einen Knopf und schließt dadurch einen Stromkreis, in dem die Klingel der zweiten Station sich befindet. Der dazu nötige Strom wird entweder durch eine Batterie oder durch die Drehung des Induktors geliefert. Dies ist das Anfangssignal für die zweite Station. Sobald dort der Angerufene sein Telephon an das Ohr hält, kann das Gespräch durch Mikrophon und Telephon geführt werden.

Man muß also eine Vorrichtung treffen, welche folgende Funktionen der Reihe nach leicht ausführt:

1. Einen Stromkreis zwischen der Batterie oder dem Induktor der ersten Station und der Klingel der zweiten zu schließen, ohne daß Mikrophon und Telephon eingeschaltet sind.
2. Diesen Stromkreis zu unterbrechen und dafür auf beiden Stationen das Mikrophon mit seinem Element zu verbinden und zugleich die Telephone miteinander in Verbindung zu setzen.

Diese Funktionen müssen so ausgeführt werden, daß sie praktisch anwendbar sind, also von jedem Laien ohne physikalische Kenntnisse benutzt werden können.

Eine solche Einrichtung, wie sie bei vielen Telephonanlagen angebracht ist, zeigt Fig. 615. Es ist dabei angenommen, daß der Strom für die Klingeln durch eine Batterie, nicht durch einen Induktor geliefert wird. Für den letzteren Fall ergibt sich eine ganz ähnliche Schaltung. In der Figur ist das Telephon mit T, das Mikrophon mit M, die Klingel mit K bezeichnet. Die primäre Induktionsspule ist mit o p, die sekundäre mit d h bezeichnet. Alle diese Teile, sowie der Taster und der Telephonhaken mit den nötigen Verbindungen sind durch eine dick gezeichnete Einrahmung eingeschlossen. Unterhalb des Rahmens ist eine Batterie gezeichnet, deren positiver Pol (Kohle) mit der Erde verbunden ist, während das Zink des Endes und ein Zink aus der Mitte mit den Klemmen W Z und M Z oberhalb der Umrahmung verbunden sind. Zwei weitere Klemmen, mit E und L bezeichnet, führen die erste zur Erde, die zweite zur Leitung nach der entfernten Station.

Das Telephon T hängt zuerst auf beiden Stationen an einem Winkelhebel, der um den Punkt U drehbar ist. Durch das Gewicht des Telephons wird dieser Hebel so gestellt, daß die Verbindungen mit t und e, welche zum Stromkreis des Mikrophons und Telephons gehören, unterbrochen sind. Dagegen wird durch den Hebel eine leitende Verbindung mit i hergestellt und von diesem aus durch die Klingel K mit b, welches an dem Druckknopf N, wenn er nicht gedrückt ist, anliegt. Wenn dieser aber

gedrückt wird, so macht er mit N Verbindung. Sobald man also auf den Knopf drückt, geht ein Strom von dem Pol W Z der Batterie durch die obere Klemme W Z, dann durch N, a zur Leitung L. Von dieser zu dem L und a der nächsten Station (in welcher auch das Telephon an dem Haken hängt) und dort durch b (da ja dort der Druckknopf nicht gedrückt ist) zu der dortigen Klingel K, dann durch i, U, E zur Erde und durch die Erde zur ersten Station zurück.

Fig. 615.

Dadurch ertönt also die Klingel der zweiten Station und die erste Funktion ist dadurch erfüllt: die Klingel der entfernten Station ist in Tätigkeit, ohne daß durch die Telephone und Mikrophone ein Strom geht.

Nun werden auf beiden Stationen die Telephone von den Haken abgenommen. Dadurch wird die Verbindung mit i unterbrochen. Die Klingeln K sind also dadurch ausgeschaltet.

Dagegen werden nun t und e durch den Hebel miteinander und durch U mit der Erde verbunden. Dadurch ist jedes Mikrophon mit seiner Batterie in Verbindung gesetzt und zugleich sind die Telephone durch die Leitung L miteinander verbunden. Denn von dem Pol M Z der Batterie geht der Strom jetzt durch die obere Klemme M Z zur primären Spule p o, von dort durch das Mikrophon M nach e und durch U, E zur Erde, zu welcher auch der andere Pol der Batterie abgeleitet ist. Zugleich gehen von der sekundären Spirale die induzierten Ströme durch h, d, b, a in die Leitung L zum Punkt b der zweiten Station, und dort durch d zu der dortigen sekundären Spirale, dann durch h zu dem dortigen Telephon T und durch g, t zur Erde. Von der Erde kommt der Strom zur Erdplatte E der ersten Station zurück und geht dann aus dieser durch t in das Telephon T und dann zur sekundären Spirale d zurück.

Damit ist also erreicht, was beabsichtigt war. Die Klingel funktioniert, ohne das Telephon zu beeinflussen, und Telephon und Mikrophon funktionieren, ohne daß die Elemente der Klingeln geschlossen sind. Man braucht nichts weiter vorzunehmen, als auf den Taster zu drücken oder den Klingelinduktor zu drehen und dann das Telephon von seinem Haken zu nehmen und zu sprechen.

Zum Zwecke des deutlicheren Hörens bringt man gewöhnlich auf jeder Station zwei Telephone an, die entweder hintereinander oder meistens nebeneinander geschaltet sind.

Gewöhnlich besteht ein vollständiger Telephonapparat aus einem Kasten, an dem das Mikrophon und die Klingel befestigt sind, während die Telephone am Haken desselben hängen. Im Innern des Kastens befinden sich die Elemente und die Verbindungen, welche durch den Taster und den Telephonhaken ein- oder ausgeschaltet werden. Werden die Klingeln durch Induktionsströme betrieben, so befindet sich auch noch der Induktor im Kasten und eine außen angebrachte Kurbel erlaubt, denselben zu drehen. Jedes solche Kästchen enthält vier Anschlußklemmen. In Fig. 615 sind sie mit W Z (Weckerzink), M Z (Mikrophonzink), E (Erde) und L (Leitung) bezeichnet. Die Batterie für die Klingel braucht mehr Elemente als die für das Mikrophon, man nimmt daher für das letztere einige Elemente der ganzen Batterie, deren einer Pol (Kohle) zur Erde abgeleitet ist, wie es in derselben Figur gezeichnet ist. Bei den neueren Stationen bringt man dagegen alle Batterien in dem Vermittelungsamt unter und der Abonnent besitzt dann bloß einen kleinen Apparat, der Telephon, Mikrophon und Klingel enthält, wie ihn Fig. 616 zeigt.

Fig. 616.

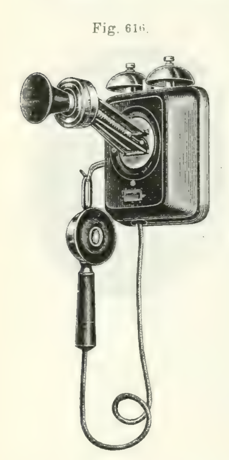


Fig. 617.



Um die Benutzung des Telephons mit Mikrophon recht bequem zu machen, ist man dazu übergegangen, Apparate zu konstruieren, bei welchen man das Telephon und Mikrophon zusammen bewegen kann und welche man auf Schreibtischen, Nachttischen u. s. w. benutzen kann. Ein solches Mikrotelephon (von Mix & Genest) zeigt Fig. 617, und aus Fig. 618 ist die Schaltung zu erkennen. Dasselbe ist so eingerichtet, daß man zu gleicher Zeit das Telephon vor das Ohr und das Mikrophon vor den

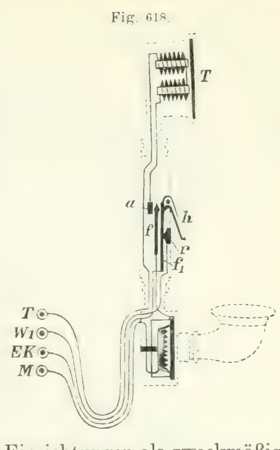


Fig. 618.

Mund halten kann. Dieselben werden als Tischtelephone, wie Fig. 619 zeigt, auf einem Gestell angebracht, das noch eine Klingel und den zugehörigen Druckknopf enthält. Die vier Leitungsdrähte vom Mikrotelephon sind in einer Leitungsschnur vereinigt, die zu einer Rosette an der Wand führt, an welcher die nötigen Verbindungen mit der Batterie, der Erde und der Fernleitung ausgeführt werden. An dem Untersatz in der Fig. 619 sind noch 10 Kontaktstücke und ein drehbarer Kontakthebel sichtbar, die den weiter unten zu besprechenden Linienwähler bilden.

Die Anordnungen zum Verbinden zweier Stationen sind naturgemäß verschieden, je nach der Anzahl der verschiedenen Sprechverbindungen, die gewünscht werden können und je nach der Entfernung der Stationen. Es haben sich verschiedene Einrichtungen als zweckmäßig erwiesen, je nachdem es sich darum handelt, nur zwischen einer kleinen

Fig. 619.

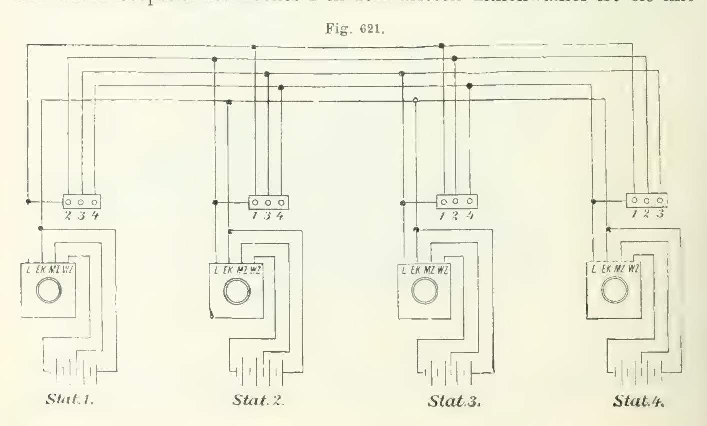


Anzahl von Stellen, wie z. B. den verschiedenen Bureaus einer Fabrik Verbindungen herzustellen, oder zwischen allen Telephonabonnenten in einer Stadt, oder endlich zwischen den Telephonabonnenten verschiedener Städte.

Wenn eine Anzahl Telephonapparate (d. h. immer Telephon, Mikrophon, Klingel und Elemente zusammen), z. B. in den verschiedenen Bureaus eines Amtes oder einer Fabrik, aufgestellt sind und die Teilnehmer nach Belieben miteinander verkehren sollen, ohne Hilfe eines Umschaltebeamten, so verbindet man mit den Telephonapparaten einen Linienwähler, wie ihn Fig. 620 zeigt. Bei jedem Telephonapparat ist ein solcher vorhanden. Er enthält so viel Kontakte, als Sprechstellen vorhanden sind, mit denen das Telephon in Verbindung gebracht werden kann. Die Einrichtung und Schaltung ist dabei deutlich aus Fig. 621 zu erkennen. In dieser sind 4 Stationen angenommen. In jeder befindet sich eine Batterie, ferner ein Telephonapparat mit 4 Anschlußklemmen L, E K, M Z, W Z (s. o. S. 664) und ein Linienwähler mit je 3 Kontakten. Will z. B. Station 3 mit Station 1 sprechen, so braucht nur Station 3 einen Stöpsel in das Loch 1 seines Linienwählers zu stecken, dann ist die Leitung zwischen 1 und 3 hergestellt. Denn die Leitung L, die von dem dritten Telephonapparat ausgeht, ist sonst überall in den Knöpfen 3 aller Linienwähler isoliert, und durch Stöpseln des Loches 1 in dem dritten Linienwähler ist sie mit

Fig. 620.

Fig. 621.

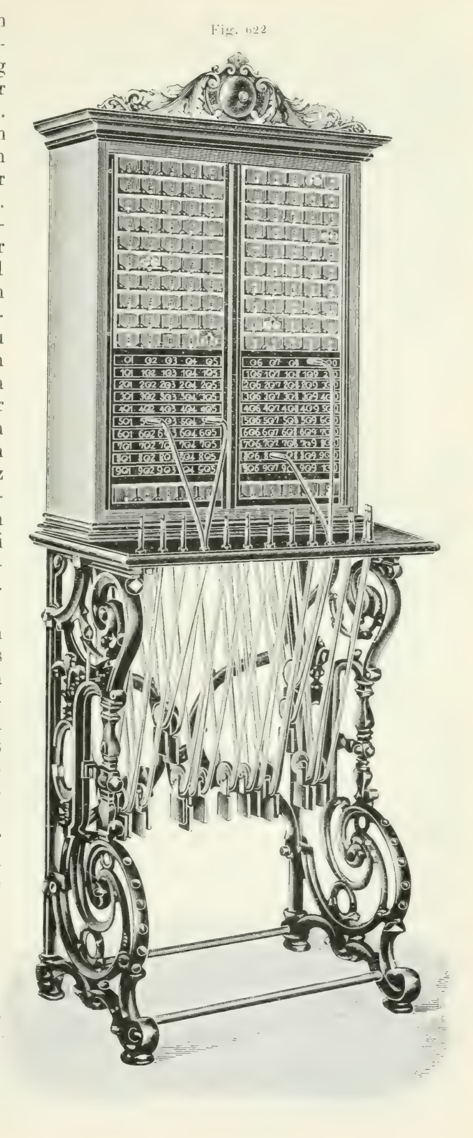


der Leitung L des ersten Telephonapparats verbunden. Zur Verbindung der 4 Stationen sind hier 5 Drähte angewendet. Man könnte mit 4 Drähten auskommen, wenn man jede Station mit der Erde verbinden würde. Ebenso sind für 10 Stationen 10 resp. 11, für 30 Stationen 30 resp. 31 Drähte erforderlich, um sie so durch Linienwähler miteinander zu verbinden. In dem oben Fig. 619 dargestellten Tischtelephon ist der Linienwähler mit den nötigen Verbindungen gleich an den Untersatz des Apparates selbst angebracht. Statt durch einen Stöpsel wird dabei durch eine drehbare Kurbel der Kontakt hergestellt.

Für den inneren Stadtverkehr ist es bei einer einigermaßen großen Zahl von Teilnehmern notwendig, ein Vermittelungsamt einzurichten, durch welches der gesamte Verkehr vermittelt wird. Denn sonst müßte jeder Teilnehmer mit jedem anderen eine besondere Verbindungsleitung haben, was, abgesehen von den Kosten, eine Unmöglichkeit wäre wegen der vielen Drähte, die über und in die Häuser führen müßten.

Deswegen geht von jedem Teilnehmer ein Draht zu dem Vermitte-

Fig. 622

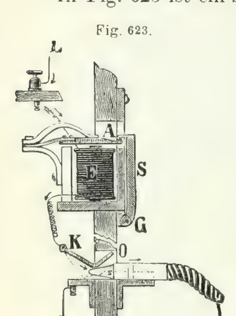


lungsamt, und diesem Amt fällt die Aufgabe zu, immer, wenn es angerufen wird, je zwei Teilnehmer miteinander in Verbindung zu bringen. Das Vermittelungsamt muß also imstande sein, jeden Anruf zu hören, aus welcher Leitung er auch komme, in jede dieser Leitungen selbst zu sprechen und je zwei Leitungen miteinander zu verbinden.

Es lassen sich natürlich auf verschiedenfache Weise Einrichtungen angeben, welche diese Verbindungen in bequemer Weise zu machen gestatten. Ein sehr verbreitetes System für solche Vermittelungsämter ist das *Klappenschranksystem*, welches wir mittels Fig. 622 u. 623 beschreiben wollen.

In dem Vermittelungsamt ist nämlich eine Reihe Schränke von der Form der Fig. 622 aufgestellt. Jeder dieser *Klappenschränke* enthält die Apparate für 50 bis 150, in der Figur für 100 Teilnehmer am Telephonverkehr, und zwar befindet sich für jeden Teilnehmer in diesem Schrank ein Elektromagnet, der direkt mit der Linienleitung von dem betreffenden Abonnenten verbunden ist.

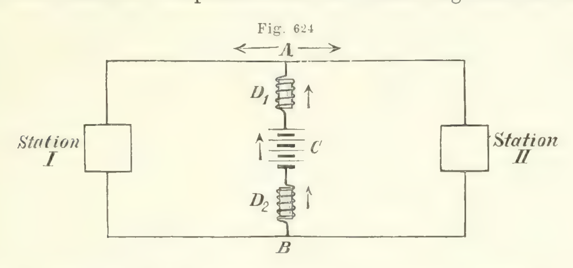
Fig. 623.



In Fig. 623 ist ein solcher Elektromagnet E gezeichnet, zu dem die Linienleitung L führt, und der andererseits durch den Winkelhebel K in der punktiert gezeichneten Lage mit der Erde e in Verbindung ist. Sobald der Abonnent seinen Taster drückt, also seine Klingelbatterie einschaltet, geht der Strom von L durch E hindurch zur Erde, der Anker A wird angezogen und läßt dabei eine Klappe S fallen, welche sich um G dreht. Hinter der Klappe ist die Nummer des Abonnenten angebracht, so daß man im Vermittelungsamt sofort weiß, welcher Abonnent sprechen will. Man sieht die Klappen in Fig. 622 im oberen Teil des Schrankes. Zu jeder Klappe gehört nun im unteren Teil des Klappenschrankes ein Loch, welche in Fig. 622 mit den Ziffern 1 bis 100 bezeichnet sind, während eines in Fig. 623 bei O dargestellt ist. Nun kann der Beamte in das Loch O, in welches der Winkelhebel K hineinragt, eine metallische Spitze s einführen, welche das eine Ende einer aus Metalldrähten gebildeten Leitungsschnur l ist. Dadurch hebt er K in die Höhe, unterbricht damit die Verbindung mit der Erde und stellt vielmehr eine Verbindung der Linienleitung L mit der Leitungsschnur her. Mit dieser Leitungsschnur ist nun der Telephonapparat des Beamten verbunden, so daß dieser jetzt mit dem Anrufenden direkt verkehren und erfahren kann, mit wem dieser sprechen will. Hat er so die Nummer des Anzurufenden gehört, so klingelt er diesen an und nimmt dann eine von den an der Tischplatte des Apparates hängenden Leitungsschnüren, deren jedes Ende eine solche metallische Spitze hat, und steckt diese Spitzen in das Loch, welches der anrufenden, und in dasjenige, welches der angerufenen Nummer zugehört. Dadurch sind die beiden Abonnenten verbunden und können sich nun unterhalten. Jeder Klappenschrank kann mit dem nächsten durch Drähte verbunden werden, so daß die Verbindung zwischen beliebigen Teilnehmern hergestellt werden kann.

Bei den großen Vermittelungsämtern ist man zu etwas anderen Einrichtungen übergegangen. Zunächst wird bei diesen das Zentralbatteriesystem eingeführt. Statt nämlich bei jedem Abonnenten für sein Mikrophon eine Batterie aufzustellen, werden alle Mikrophone, die gerade benutzt werden, von einer großen Batterie, die in der Zentrale steht, gespeist. Das ist aber nicht so ohne weiteres möglich, wie es auf den ersten Blick erscheint. Denn, wenn in Fig. 624 die Zentralstation durch ihre Batterie C sowohl das Mikrophon von Station I, wie das von Station II speist, die beide gerade miteinander sprechen, so können auch die Telephonströme von Station I, statt nach II zu gelangen, vielmehr über A, C, B gehen und ebenso die Telephonströme von II den Weg über die Zentral-

Fig. 624



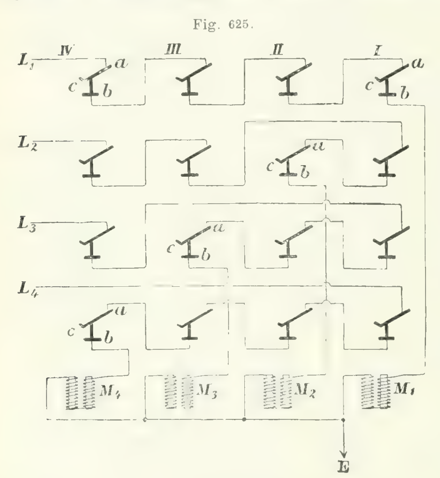
batterie einschlagen. Die Zentralbatterie bildet einen Nebenschluß sowohl für Station I wie für Station II. Um das zu vermeiden, schaltet man hinter die Zentralbatterie Drosselspulen D_1 und D_2 (S. 229) ein. Diese gestatten wohl den Gleichströmen, die von der Batterie ausgehen, den Durchgang, da sie geringen Widerstand haben, dagegen den Telephonströmen, die ja Wechselströme sind, verschließen sie den Durchgang wegen ihrer hohen Induktionswirkung.

Statt der fallenden Klappen hat man weiter jetzt in den Zentralen vielmehr kleine Glühlämpchen (von der Größe eines Pfennigstückes) angebracht, für jeden Abonnenten eines, welches durch den Strom beim Anrufen aufleuchtet und damit dem Beamten sofort deutlich zeigt, wo eine Verbindung gewünscht wird. Wenn das Gespräch zwischen zwei Teilnehmern beendet ist und beide ihre Telephone wieder an den Haken gehängt haben, so leuchten zwei andere, gewöhnlich rote Glühlampen auf, welche den Beamten auffordern, die Verbindung zwischen den beiden Abonnenten zu lösen. Der Verkehr wickelt sich dadurch ruhiger und sicherer ab, als wenn fortwährend Klappen fallen und wieder aufgerichtet werden müssen.

Das einfache Klappenschranksystem eines Vermittelungsamtes, wie es eben geschildert wurde, wird aber sofort umständlich, sowie an das Vermittelungsamt sehr viele Teilnehmer angeschlossen sind. Sind z. B. 2000 Teilnehmer vorhanden, so braucht man 40 Klappenschränke, zwischen denen eine Anzahl Leitungen zur Verbindung angebracht sein müssen. Wenn nun ein an den ersten Schrank angeschlossener Teilnehmer mit einem etwa an den 30sten angeschlossenen zu sprechen wünscht, so muß der Beamte des ersten Schranks dem entfernten Beamten den Auf-

trag geben, die dortige Verbindung herzustellen. Und offenbar kommt es bei großer Zahl der Teilnehmer viel öfter vor, daß zwei verschiedene Klappenschränke verbunden werden müssen, als daß gerade zwei Teilnehmer desselben Schranks miteinander sprechen wollen. Diesen Übelstand, daß nicht ein Beamter die notwendigen Verbindungen allein ausführen kann, sondern einen zweiten dazu braucht, suchte man zu vermeiden, und es gelingt das durch das sogenannte Multiplexsystem oder den Vielfachumschalter. Derartige Einrichtungen werden von Mix & Genest, Siemens & Halske und anderen Firmen vielfach gebaut. Das Prinzip der Vielfachumschalter ist eigentlich ganz einfach. Es wird nämlich die Leitung, die von einem Teilnehmer kommt, nicht direkt zu seinem Klappenschrank geführt, sondern sie wird zunächst bei allen anderen Klappenschränken vorbei oder eigentlich durch sie hindurchgeführt und gelangt erst zuletzt zu seinem eigenen Klappenschrank, wo sie in gewöhnlicher Weise mit dem Elektromagnet und der Klinke verbunden ist, wie vorher beschrieben. Dadurch nun, daß jede Leitung bei allen Klappenschränken vorbeigeführt wird, kann man jetzt leicht die Einrichtung so treffen, daß sie an jedem einzelnen Klappenschrank einen beweglichen Teil, eben wieder eine solche Klinke (aber keinen Elektromagnet) erhält, in die man einen Leitungsstöpsel einstecken kann. Jeder Beamte hat nun an seinem Klappenschrank 200 Elektromagnete mit ihren Klinken, die er zu bedienen hat,

Fig. 625.



außerdem aber befinden sich an seinem Schrank (bei 2000 Teilnehmern) noch 1800 Löcher, die eben die Klinken (aber nicht Elektromagnete) für alle anderen Teilnehmer enthalten. Ein Amt für 2000 Abonnenten besteht daher aus 10 Schränken, von denen jeder 200 Elektromagnete (mit ihren Klappen) und 200 + 1800 Löcher mit ihren Klinken besitzt. Die Leitungsführung ist schematisch in Fig. 625 gezeichnet. Die mit I, II, III, IV überschriebenen vertikalen Kolonnen stellen 4 Klappenschränke dar. Es bedeutet L_1 eine Leitung, die an den ersten Klappenschrank angeschlossen ist (also an eine Nummer zwischen 1 und 200). Diese Leitung führt aber, wie man sieht, erst zu der Klinke a b im Schranke IV, dann von dort aus zur Klinke in Schrank III, von dort zur Klinke in Schrank II, dann erst zur eigentlichen Klinke in Schrank I und von dort in ihren Elektromagneten M_1 und zur Erde E. Ebenso führt die Leitung L_2 eines Abon-

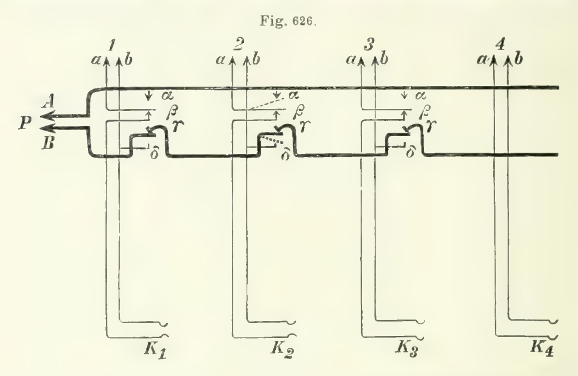
nenten mit einer Nummer zwischen 201 und 400 erst zu einer Klinke in Schrank IV, dann zum Schrank III, dann zu I und dann endlich zu ihrer eigentlichen Klinke in Schrank II, von dort zum Elektromagneten M_2 und zur Erde. Und so fort. Nun sieht man, daß jeder Beamte an seinem Schrank alle beliebigen Verbindungen vornehmen kann. Wird z. B. der Beamte am Schrank IV gerufen (also von einem Abonnenten mit einer Nummer zwischen 601 und 800), so fällt die Klappe am Elektromagneten M_4. Der Abonnent will mit einem bestimmten Teilnehmer sprechen, der an Schrank I angeschlossen sei (1—200), z. B. mit demjenigen, dessen Leitung L_1 gerade gezeichnet ist. Nun steckt der Beamte die Stöpsel an seinem eigenen Schrank in die beiden Löcher mit der betreffenden Nummer und die Verbindung ist fertig. Denn es geht der Strom von der Leitung L_1 zur Klinke b a in der untersten Reihe des Schrankes IV, die durch den Stöpsel unterbrochen ist, durch den Stöpsel zur Klinke b a in der obersten Reihe desselben Schrankes IV, die ebenfalls unterbrochen ist, und durch die Leitung L_1 zum gewünschten Abonnenten. So weit ist die Anordnung leicht verständlich. Aber man erkennt auch sofort, daß die Hauptschwierigkeit dabei die umständliche und mühsame Montage ist. Denn es müssen in unserem Beispiel von 2000 Abonnenten an jedem Schrank 2000 Klinken, im ganzen also 10 $\times$ 2000 Klinken, bei 6000 Abonnenten sogar 180 000 Klinken angebracht werden. Die Übersichtlichkeit der Leitungsführung und die Möglichkeit, rasch etwaige Schäden erkennen und reparieren zu können, sind bei diesen großen Einrichtungen natürlich Hauptforderungen.

Die Klappenschränke werden übrigens nicht bloß in den Vermittelungsämtern für den ganzen Stadtverkehr gebraucht. Auch in großen Fabriken, Banken, Ämtern, wo oft Hunderte von Einzelpersonen abwechselnd miteinander zu sprechen haben, werden solche Klappenschränke zur Vermittelung aufgestellt, gewöhnlich beim Portier, der dann die Verbindungen auszuführen hat. Gegenüber dem Linienwählersystem erspart bei einer großen Zahl von Sprechstellen das Klappenschranksystem bedeutend an Leitungs- und Apparatkosten.

In Deutschland ist es nach Reichsgesetzen erlaubt, an jede amtliche Sprechstelle noch fünf Nebenstellen anzuschließen, so daß jede dieser Nebenstellen direkt mit dem Amt verkehren kann, falls die Einrichtungen so getroffen sind, daß nur diese Nebenstellen (für welche Gebühr gezahlt wird) und keine anderen sich mit dem Amt in Verbindung setzen können. Aus dem Gesetzesdeutsch in verständliches Deutsch übertragen, besagt das folgendes. Eine Fabrik, die ein privates Vermittelungsamt, etwa für 60 Bureaus hat, und die eine Leitung zu dem staatlichen (Post-) Amt hat, darf bis zu 5 dieser Bureaus mit Einrichtungen versehen, daß diese auf der einen Leitung direkt mit dem Postamt verkehren können, wenn dafür gesorgt ist, daß keine unerlaubte Verbindung gemacht werden kann, daß also nicht eins von den anderen 55 Bureaus sich durch Stöpselverbindung oder Leitungsumschaltung mit dem Amt in Verbindung setzen kann. Dieser Forderung genügt unter anderen ein Schaltersystem, welches von der Aktiengesellschaft Mix & Genest eingeführt wurde, und welches sie als J a n u s s y s t e m bezeichnet, in Anknüpfung an den altitalischen Gott, der mit zwei Gesichtern, einem freundlichen und einem

finstern, dargestellt wurde. Ein Janustelephon kann eben auch sowohl mit dem gestrengen staatlichen Amt, wie mit der gemütlichen Privatvermittelungsstelle in Verbindung gesetzt werden, und da unsere Techniker bei ihrem Studium immer weniger von klassischer Bildung in sich aufnehmen, ist es ganz erfreulich, daß hie und da einmal eine klassische Reminiszenz in der Technik auftritt. Trotz des klangvollen Namens ist die Sache, die damit bezeichnet wird, übrigens sehr einfach. Es handelt sich nur um eine Umschaltung eines Apparates auf die eine oder andere Leitung, die nicht mißbräuchlich ausgenutzt werden kann. Aus Fig. 626 wird dieselbe hervorgehen. In dieser ist angenommen, daß in einem Klappenschrank eine Anzahl von Doppelleitungen von den Nebenstellen 1, 2, 3, 4 zu Klinken K_1, K_2, K_3, K_4 führen, wo sie durch Schnüre von dem Privatvermittler (Portier) beliebig verbunden werden können. Die

Fig. 626.



beiden Leitungen sind als a und b unterschieden. Senkrecht zu den Drähten a b führen nun die Drähte A B der Postleitung. An jeder von den Nebenstellen 1, 2, 3, die mit dem Amt verkehren sollen, ist nun ein Schalter angebracht, eben der Janusschalter. Die Leitung b führt nämlich jedesmal direkt zur Klinke, und von ihr sind abgezweigt die Kontakte δ, die Leitung a aber führt zunächst zu einem Kontakte β, und dann erst zur Klinke. Von den beiden Kontakten δ und β ist immer einer wirksam (Arbeitskontakt), wenn der andere unbenutzt ist (Ruhekontakt). Umgekehrt zweigen von der Postleitung A, die sonst direkt durch den Klappenschrank geht, die Kontakte α ab, während die Leitung B über die Kontakte γ führt. Der Janusschalter, der an jeder dieser Stellen 1, 2, 3 am Telephon angebracht ist, bringt nun die entsprechenden Leitungen einmal an die Kontakte β und γ, das andere Mal an α und δ. An der Nebenstelle 2 ist die zweite Schaltung punktiert gezeichnet. Sind die Leitungen so geschaltet, wie an den Stellen 1 und 3, so ist die Amtleitung jedesmal nicht eingeschaltet, weil bei α kein Kontakt gemacht ist, dagegen können diese Nebenstellen unter sich durch die Klinken K verkehren. Wird aber der Schalter umgelegt, wie in Nebenstelle 2, so daß α mit a und dadurch mit A, und B mit δ und dadurch mit b verbunden ist, so

kann die Stelle mit dem Amt verkehren. Aber keine andere Nebenstelle kann während der Zeit mit 2 und dadurch mit dem Amt verkehren, denn die Klinke K_2, die ja mit β verbunden ist, ist abgeschaltet. Auf diese einfache Weise ist jeder Mißbrauch beseitigt. Nur durch Umänderung des ganzen Apparates, die man aber bei einer Kontrolle sofort erkennen würde, könnte eine mißbräuchliche Verbindung gemacht werden. Die Umschaltung auf Amt oder Haustelephon wird durch einen Schalter mit Knopf von der Form bewerkstelligt, wie sie in Fig. 627 gezeichnet ist. Durch Drehen des Knopfes wird die eine oder andere der beschriebenen Verbindungen ausgeführt. Dieselbe Einrichtung läßt sich auch bei Linienwählern ausführen.

Man hat sich schon lange bemüht, die menschliche Tätigkeit in einem Vermittelungsamt entbehrlich zu machen, und automatische, durch Elektrizität vermittelte Verbindungen je zweier beliebiger Abonnenten herzustellen. Natürlich ist das ein äußerst kompliziertes Problem, sobald es sich um eine größere Anzahl von Teilnehmern handelt. Denn wenn z. B. in einer Stadt 10 000 Telephonbesitzer sind, so muß jeder imstande sein mit den anderen 9999 sprechen zu können, es muß also das automatische Amt es fertig bringen, nach Belieben jede beliebige von 99 990 000 möglichen Verbindungen herzustellen. Und doch ist es gelungen, ein solches System, das ohne allzu große Kompliziertheit und dabei mit großer Sicherheit arbeitet, auszudenken. Dieses System, das von dem Amerikaner Strowger ausgearbeitet ist und das Strowgersche System genannt wird, breitet sich in den letzten Jahren immer mehr aus, sowohl in Amerika wie auch in Europa und namentlich in Deutschland, wo es von Siemens & Halske eingeführt wird.

Fig. 627.

Sehr einfach ist das System bei bloß 100 Teilnehmern. Fälle, in denen es bei so geringer Zahl von Abonnenten eingerichtet wird, kommen aber häufig vor. Denn da eben jeder Teilnehmer sich automatisch mit jedem anderen verbinden kann, so ist ein solcher Telephonverkehr bei Tag und Nacht immer betriebsbereit, während sonst bei so kleinen Zentralen mit menschlicher Bedienung gewöhnlich nur Tagesdienst und dazu noch beschränkter eingeführt ist.

Das Wesentliche bei dem Strowgerschen System sind die sogenannten Wähler, die unterschieden werden in Vorwähler, Gruppenwähler und Leitungswähler. Bei dem Amt von 100 Anschlüssen kommen nur die Leitungswähler in Betracht. Das sind Apparate, welche, durch Elektromagnete angetrieben, sich sowohl um 1 bis 10 Schritte heben, wie auch um 1 bis 10 Schritte drehen können. In Fig. 628 sieht man das Schema eines solchen Leitungswählers. Eine Achse, die oben 10 horizontale Nuten A und darunter 10 vertikale Nuten B hat, trägt zwei (in anderen Fällen drei) mit ihr fest verbundene Kontaktarme H und K, von denen K in der Figur aus zwei voneinander isolierten Teilen besteht. Durch den oben gezeichneten Hubmagneten kann der anrufende Abonnent 1 bis 10 kurzdauernde Ströme schicken. Dadurch wird der Anker dieses

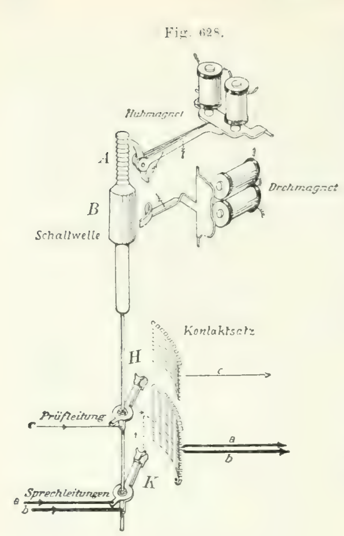
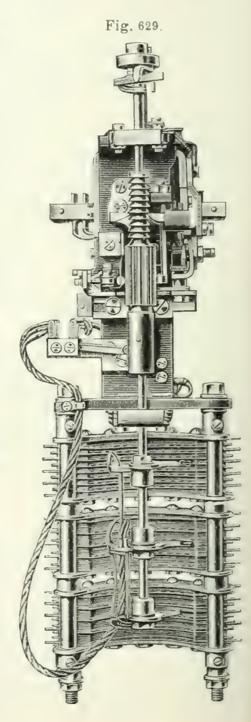


Fig. 628.

Magneten jedesmal angezogen und seine Spitze greift in die Nuten A ein und hebt dadurch die Achse und mit ihr die Kontaktarme um 1 bis 10 Schritte. Darauf kann der Teilnehmer den zweiten, darunter gezeichneten Drehmagneten durch 1 bis 10 kurzdauernde Ströme erregen. Dessen Anker greift dann in die Nuten B ein und dreht die Achse, und mit ihr die Kontaktarme, um 1 bis 10 Schritte. Die Kontaktarme bewegen sich vor je einem Kontaktsatz, der aus 100 Kontakten in 10 Reihen à je 10 Kontakten besteht. Je ein Kontakt ist mit der Leitung zu je einem Abonnenten verbunden. Wie beim Multiplexsystem geht aber die Leitung jedes Abonnenten zu dem entsprechenden Kontakt bei allen Leitungswählern, von denen für jeden Abonnenten einer aufgestellt ist. Auf diese Weise hat der rufende Teilnehmer sich selbst die Verbindung mit dem gewünschten Teilnehmer hergestellt und das Gespräch kann nun in der gewohnten Weise stattfinden. Die Ansicht eines solchen Wählers mit seinen Kontaktsätzen gibt Fig. 629. An diesem Wähler sind drei Kontaktsätze und drei Arme angebracht, je einer für die beiden Leitungen zum Abonnenten und einer für die Prüfleitung von dem Amt. Um die Magnete zu betätigen, besitzt jeder Abonnent an seinem Telephonapparat einen sogenannten Nummernschalter, wie ihn Fig. 630 an einer Tischstation zeigt. Eine Scheibe mit 10 Löchern, von 1 bis 0, kann durch Einstecken eines Fingers in eines der Löcher im Sinne des Uhrzeigers bis zu einem Anschlag gedreht werden. Der Abonnent, der z. B. Nr. 48 anrufen will, schiebt die Scheibe von dem Loch 4 bis zum Anschlag und läßt sie dann los. Beim Zurückschnellen der Scheibe werden dadurch 4 kurze Ströme in das Amt gesendet, welche den Hubmagneten betätigen und den Wähler des anrufenden Abonnenten

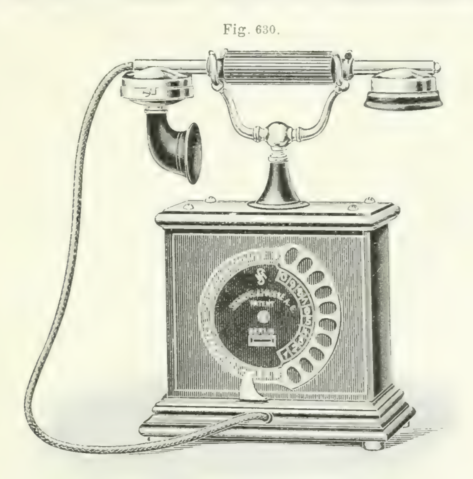
Fig. 629.



um 4 Schritte in die Höhe heben, so daß sein Kontaktstück in derselben Höhe wie die Kontakte der Abonnenten 40 bis 49 steht. Durch das weitere Drehen der Scheibe von 8 an werden nun 8 kurze Ströme in das Amt gesendet, welche auf den Drehmagneten wirken und den Wähler um 8 Schritte drehen, so daß dieser am Schluß gerade mit dem Kontaktstück 48 Verbindung hat und dadurch den anrufenden mit dem angerufenen Abonnenten in Verbindung gebracht hat.

So einfach das System bei 100 Teilnehmern ist, so läßt sich doch dasselbe nicht sofort auf mehr Teilnehmer ausdehnen, weil im allgemeinen nicht mehr als die 10 vertikalen und die 10 drehenden Schritte gemacht

Fig. 630.



werden können. Man müßte dann neue Wähler für die Hunderte und Tausende haben, und die Zahl der Wähler und der Anschlüsse würde natürlich ins unheimliche wachsen. Aber erfahrungsgemäß sprechen von allen Abonnenten einer Telephonzentrale höchstens 10 Proz. gleichzeitig. Man braucht deswegen bei 1000 Abonnenten gar nicht für jeden Abonnenten einen eigenen Leitungswähler (für die Zehner und Einer), also im ganzen 1000, sondern es genügt, wenn man 100 solche Leitungswähler aufstellt und nur dafür sorgt, daß der Abonnent, der den Anruf machen will, einen gerade unbenutzten von diesen Wählern selbsttätig sich aussuchen kann. Bei einem Amt bis zu 1000 Abonnenten muß man nun noch einen eigenen Wähler für die Hunderter haben. Diesen Wähler nennt man G r u p p e n w ä h l e r. Er ist ebenso eingerichtet wie der Leitungswähler, nur daß die Drehung der Kontaktarme bei ihm selbsttätig erfolgt. Auch von solchen Gruppenwählern braucht man nur 10 Prozent der Zahl der Abonnenten, also in unserem Fall 100. Die Einrichtung ist dann die folgende. Für jeden der 1000 Abonnenten ist ein sogenannter V o r w ä h l e r in dem

Amt. Das ist ein kleiner Apparat, der elektrisch oder mechanisch angetrieben werden kann und der, sobald der Anrufende seine erste Nummer dreht, selbsttätig sich einen freien Gruppenwähler aussucht und den anrufenden Abonnenten mit diesem leitend verbindet. Da zu 1000 Abonnenten nur 100 Gruppenwähler gehören, so ist jedes Hundert der Abonnenten mit 10 Gruppenwählern in Verbindung und zwar in der Vielfachschaltung, die wir oben S. 670 besprochen haben. Hat also der Vorwähler des Abonnenten einen freien von den 10 Gruppenwählern gefunden, so dreht nun der Abonnent seine Nummernscheibe, um die Hunderter einzustellen, z. B. bei 637, von der Zahl 6 an. Beim Rückschnellen der Nummernscheibe gehen 6 Ströme in das Amt, die den vorher ausgewählten Gruppenwähler um 6 Schritte in die Höhe heben. Sobald er aber diese Höhe erreicht hat, dreht sich sein Kontaktarm selbsttätig um 1 bis 10 Schritte, an 10 Kontakten vorbei, an deren jedem ein Leitungswähler angeschlossen ist (nämlich die 10 Leitungswähler für 600—699). Der Kontaktarm bleibt stehen, sobald er einen gerade unbenutzten Leitungswähler gefunden. (Wie er das merkt, das läßt sich auf mehrfache Weise erreichen, mechanisch oder elektrisch; mechanisch dadurch, daß die schon benutzten, also nicht freien Leitungswähler, ja nicht in der Ruhelage sind, elektrisch dadurch, daß sie Ströme führen.) Bei dem freien Leitungswähler bleibt er stehen. Da dieser Leitungswähler mit den 100 Abonnenten 600—699 verbunden ist, so braucht der Anrufende jetzt nur auf diesem die 3 und dann die 7 zu drehen, um mit dem gewünschten Abonnenten 637 seine Verbindung zu haben. So hat er durch vier Bewegungen (eine für den Vorwähler und drei für die Nummern) sich aus 1000 Abonnenten den richtigen herausgesucht. Ist nun dieser Abonnent frei, so kann das Gespräch beginnen; ist er belegt, gehen also durch seinen Kontakt schon Ströme, so bringen diese in dem Telephon des anrufenden Abonnenten ein Summen od. dergl. hervor, so daß er das Belegtsein erkennt und sofort sein Telephon wieder anhängen und auf eine bessere Zeit zum Sprechen warten kann. Nach Anhängen des Telephons gehen nämlich die Wähler, der Vorwähler, Gruppenwähler und Leitungswähler von selbst wieder in die Ruhelage zurück. Das System ist, wie man sieht, ganz wunderbar ausgedacht; sowohl die Idee der Leitungswähler selbst, wie namentlich die Idee der Vorwähler mit der daraus resultierenden großen Ersparnis von Gruppen- und Leitungswählern sind ganz vortrefflich. Das System findet da, wo es eingerichtet ist, überall fast ungeteiltes Lob. Natürlich ist die Montage außerordentlich kompliziert, und es ist eine fortwährende Kontrolle der Apparate notwendig. Bei den vielfachen Klagen aber, die in fast allen großen Städten über die telephonische Vermittelung laut werden oder auch, um die Telephonfräuleins nicht zu kränken, leise bleiben, ist es wahrscheinlich, daß man allmählich immer mehr zu einer derartigen automatischen Verbindung übergehen wird, wie es in Amerika schon sehr häufig geschieht. In Deutschland sind namentlich in München zwei solche automatische Zentralen für die Abonnenten in zwei Teilen der Stadt eingerichtet und in anderen Städten sind solche im Begriff, eröffnet zu werden.

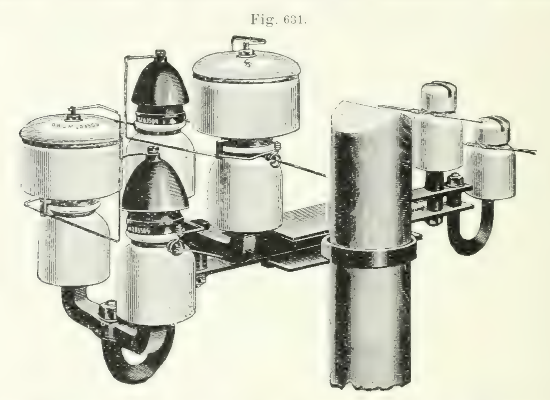
Während der telephonische Verkehr innerhalb der Städte sich sehr intensiv entwickelte, entstand naturgemäß rasch das Verlangen, auch getrennte Städte miteinander so zu verbinden, daß jeder Telephoninhaber

der einen Stadt mit jedem der anderen Stadt beliebig sprechen könnte, also einen interurbanen Telephonverkehr einzurichten. Diese Verbindung fand aber zuerst große Schwierigkeiten. Wenn die Leitung zwischen beiden Städten in der Nähe der Telegraphenleitungen geführt werden sollte, so wirkte die Induktion der Telegraphierströme auf das Telephon und machte jedes Verstehen unmöglich. Diesen Übelstand aber vermeidet man einfach und sicher dadurch — und die telephonischen Städteverbindungen werden jetzt allgemein so eingerichtet —, daß man die beiden Städte nicht durch einen einzigen Draht, sondern durch eine sogenannte Schleife, eine hin- und zurückführende Leitung verbindet. Dadurch werden die Telephone fast unempfindlich gegen äußere Einflüsse. Wenn nämlich irgendwo von außerhalb ein Strom in dem einen Draht induziert wird, so wird zugleich durch dieselbe Ursache in dem danebenliegenden zweiten Draht ein Strom in derselben absoluten Richtung induziert. Diese beiden Ströme fließen also in der Hin- und Rückleitung gegeneinander und heben sich daher auf. Die Telephone merken nichts davon. Die beiden Leitungen müssen natürlich auf denselben Stangen geführt werden. Auf jeder Station werden bei der Fernleitung die beiden Enden der sekundären Induktionsspulen mit den beiden Linienleitungen (also nicht das eine Ende mit der Erde) verbunden. Bei dieser Doppelleitung oder, wie man es nennt, Schleifenleitung ist es nun möglich, auf gewöhnlichen Telegraphendrähten einige hundert Kilometer weit zu telephonieren. Bei größeren Entfernungen aber hat es sich gezeigt, daß man mit Leitungen aus Eisen keine Wirkungen mehr erzielt, der Widerstand gegen die Wechselströme, die Impedanz (S. 248) wird zu groß und die Ströme werden zu sehr geschwächt. Mit Leitungen aus Kupfer oder Bronze kommt man viel weiter.

Und dieses System der telephonischen Fernverbindungen breitet sich stets weiter aus. Große Industriebezirke, bedeutende Handelsstädte werden miteinander telephonisch verbunden, und das Ende dieser Einrichtungen dürfte erst dann erreicht sein, wenn jeder Mensch aus irgend einer Groß- oder Mittelstadt Europas mit jedem anderen in einer ebensolchen Stadt sich telephonisch wird unterhalten können. Je länger allerdings die Strecken sind, auf welche telephoniert werden soll, desto stärker werden die Ströme durch die Leitung geschwächt, und man kommt so zu einer Grenze, an welcher eine Verständigung nicht mehr möglich ist. Die Schwächung der Telephonströme aber beruht auf zwei Ursachen. Erstens auf dem Widerstand der Leitung, durch welchen die Energie in Joulesche Wärme verwandelt wird. Zweitens aber noch auf einem besonderen Umstand, der bei langen Leitungen und namentlich bei unterirdischen Leitungen sich bemerkbar macht und der in der Telegraphie schon lange erkannt war. Jedes Kabel besteht ja aus einer inneren Seele, einer darum liegenden isolierenden Schicht und einem um diese Schicht liegenden Leiter (Blei, Wasser, feuchte Erde u. s. w.). Es verhält sich also ein Kabel in dieser Beziehung wie ein Kondensator (S. 26). Aber auch eine freie Luftleitung kann als eine Art Kondensator angesehen werden. Der Draht selbst ist die eine Belegung, die Luft ist die isolierende Zwischenschicht und der Erdboden, resp. die in der Nähe des Drahtes befindlichen Stangen und die Metallteile derselben sind die

andere Belegung. Daraus ergibt sich, daß jede Kabelleitung, aber auch jede Freileitung Kapazität besitzt. Gehen nun Ströme durch eine solche Leitung, so laden sie den Kondensator, d. h. auf der freien Oberfläche des Drahtes sammelt sich Elektrizität an. Wenn nun Wechselströme in dem Draht fließen, wie es die Telephonströme sind, so wird der Kondensator auch abwechselnd entgegengesetzt geladen und entladen, es treten also noch solche hin und her gehende Ladungs- und Entladungsströme auf, welche für die eigentliche Tonübermittelung schädlich sind. Sie verlaufen nämlich nicht in derselben Phase, wie die eigentlichen Telephonströme, sondern bringen Phasenänderungen hervor, wodurch die Klangfarbe der übertragenen Laute verändert wird und zum Teil bis zur Unverständlichkeit verzerrt wird. Diese Wirkung wird nur auf langen Leitungen merklich, ist aber da imstande, die ganze tele-

Fig. 631.

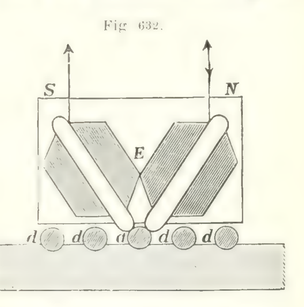


phonische Übertragung unmöglich zu machen. Diesen Übelstand aber kann man dadurch verringern, daß man in die Leitung in bestimmten Abständen Rollen einsetzt, welche Selbstpotential besitzen. In diesen Rollen entstehen Extraströme, welche selbst ebenfalls Phasenveränderungen des Stromes hervorbringen, aber im umgekehrten Sinne. Wir haben (S. 264) gesehen, daß bei einem Wechselstrom eine eingeschaltete Selbstinduktion den Strom verspätet, eine eingeschaltete Kapazität ihn zum Voreilen bringt gegenüber der wirkenden Spannung. Man kann daher die Selbstinduktionsspulen so wählen, daß sie, in bestimmten Entfernungen angebracht, immer gerade die Kapazitätswirkung des Kabels in Bezug auf die Phasenänderung aufheben. Natürlich wird durch diese Selbstinduktionsspulen der Telephonstrom geschwächt, aber im ganzen wird doch durch sie eine Verbesserung des Stromdurchgangs hervorgebracht. Auf Grund dieser Tatsachen und Überlegungen ist ein Leitungssystem, das von Pupin ausgearbeitet ist und das gerade auf der Einschaltung solcher Selbstinduktionsspulen beruht, von Siemens & Halske mit großem Erfolge praktisch eingeführt worden. Die Anbringung solcher Spulen, sogenannter Pupinspulen, auf dem Leitungsgestänge zeigt Fig. 631. Dieselben

sind in Porzellangefäße eingeschlossen und werden neben den Leitungsisolatoren auf den Stangen angebracht, und sie werden direkt in die Leitung eingeschaltet. Bei langen Kabeln führt man sogar die Spulen direkt in die Kabel selbst ein. Durch dieses System wird die Länge der Leitung, auf welche man sicher telephonieren kann, bedeutend vergrößert, so daß man jetzt auf viel größere Entfernungen als früher sehr verständlich sprechen kann.

So vortreffliche Dienste das Telephon auch leistet zur unmittelbaren Unterredung zwischen zwei entfernten Personen, so haftet ihm doch noch der Mangel an, daß ein solches Gespräch vorübergeht, ohne eine selbständige Aufzeichnung zu hinterlassen. Für wichtige, dem Wortlaut nach genau festgestellte Mitteilungen muß man sich eben mit schriftlicher Fixierung des Gehörten behelfen. Wenn das Telephon die Aufzeichnung selbst machen könnte, so wäre das ein weiterer Fortschritt. Dieser würde auch dann von Wichtigkeit sein, wenn die angerufene Person nicht zu erreichen ist und der Anrufende doch seine Mitteilung gleich machen möchte. Diese weitergehenden Anwendungen des Telephons sind in vortrefflicher und einfacher Weise ermöglicht worden durch das Telegraphon des dänischen Ingenieurs Poulsen, welches auf der Ausstellung in Paris im Jahre 1900 berechtigtes Aufsehen machte. Dasselbe ist eine geniale Verbindung des Telephons mit dem Phonographen, zwar nicht des Phonographen in der bekannten Edisonschen Form mit Wachswalzen, wohl aber einer ganz neuen Art von Phonographen. Der phonographische Teil ist das Besondere und Neue des Apparates. Während bei dem gewöhnlichen Phonographen auf einem Wachszylinder durch die Membran, gegen die man spricht, einfach mittels einer an derselben befestigten Spitze Eindrücke gemacht werden, werden hier die Eindrücke durch die Telephonströme unsichtbar auf einem Stahldraht erzeugt, indem dessen magnetische Eigenschaften dazu benutzt werden. Zu dem Zweck ist ein Stahldraht von 1 mm Dicke auf einem Messingzylinder in vielen Windungen aufgewickelt und ein kleiner Magnet umfaßt mit seinen beiden Polen diesen Draht, indem er bei der Drehung des Zylinders allmählich den ganzen Draht entlang gleitet. In Fig. 632 ist stark vergrößert der Durchschnitt durch eine Reihe dieser Drahtwindungen d, d, d . . . zu sehen und zugleich der Elektromagnet E, der einen Strom durch die Leitungen S und N bekommt und dessen Pole den Draht berühren. Der Elektromagnet wird von einem Element erregt, so daß der Draht auf der einen Seite seines Querschnitts nordmagnetisch, auf der anderen südmagnetisch wird, und wenn der Magnet längs des Drahtes sich vorbeischiebt, so wird der Draht auf seiner ganzen Länge in der angegebenen Weise quermagnetisiert, d. h. die eine Seite des Drahtes wird nordmagnetisch, die andere südmagnetisch und zwar an allen Stellen des Drahtes gleichmäßig. Wenn man aber nun den Elektroma-

Fig. 632.



gneten, während er so an dem Draht vorbeigleitet, abwechselnd verstärkt und schwächt, so werden die einzelnen Teile des Drahtes verschieden stark magnetisiert werden und auch diese Verteilung des Magnetismus bleibt auf dem Draht bestehen, wenn der Magnet auch weiterrückt.

Fig. 633.

Nun kann man aber solche Verstärkungen und Schwächungen des Elektromagneten dadurch leicht erzeugen, daß man in seinen Stromkreis außer dem Strom von dem Element noch Telephonströme hineinleitet, und zwar so, wie es in Fig. 633 gezeichnet ist. In dieser ist M ein Mikrophon und die von einer Batterie B erzeugten Ströme, die beim Hineinsprechen in das Mikrophon in ihrer Stärke verändert werden, gehen wie gewöhnlich durch die primäre Spule S_1 eines kleinen Induktionsapparates. In der sekundären Spule S_2 desselben entstehen Ströme von veränderlicher Stärke und Richtung, welche sich über die vom Element P erzeugten Ströme überlagern und den Magneten E des Telegraphons schwächen oder verstärken. Dadurch wird also der Stahldraht d, wenn der Elektromagnet bei ihm vorbeigeht, seiner ganzen Länge nach in bestimmter Weise bald stärker, bald schwächer magnetisch.

Durch diese wechselnde Magnetisierung kann man nun aber umgekehrt in einem Telephon wieder Töne erzeugen. Zu dem Zwecke braucht man nun bloß wieder, wie Fig. 634 zeigt, den Magneten E, aber ohne Element P, mit einem Telephon zu verbinden und ihn an dem magnetisierten Stahldraht vorbeizuziehen. Dann werden durch dessen Magnetismus in den Umwindungen des Magneten wechselnde Ströme induziert und diese erzeugen in dem Telephon T jetzt dieselben Töne, welche man vorher in das Mikrophon hineingesprochen oder -gesungen hat.

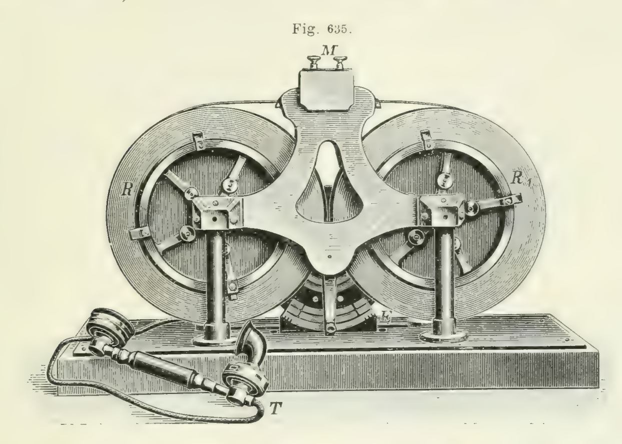
Fig. 634.

Auf diese höchst interessante Weise kann man also die Töne beliebig lange auf dem Stahldraht aufheben und zu beliebiger Zeit wieder hervorbringen und zwar beliebig oft. Und dabei hat sich gezeigt, daß die Reproduktion der Töne durch einen solchen Apparat außerordentlich rein, frei von all den störenden Nebengeräuschen ist, die man beim gewöhnlichen Telephon und beim gewöhnlichen Phonographen so unangenehm empfindet.

Die Apparate werden entweder mit Stahldrähten oder mit Stahlbändern ausgeführt und haben dann verschiedene Formen. Eine neuere Form des Apparates zeigt Fig. 635. Das Stahlband von beträchtlicher Länge ist auf eine Spule aufgewunden und durch Drehung des Apparates mittels eines Elektromotors windet sich das Band auf die andere Spule auf, wobei es an dem Magneten vorbeigeführt wird, der es quer magnetisiert.

Wenn ein solches Band mit der Schrift versehen ist, so kann man dieselbe auch wieder auslöschen, zwar nicht durch Radiergummi, aber fast noch einfacher, nämlich wieder durch einen elektrischen Strom. Man

Fig. 635.



schaltet zu dem Zweck bloß, wie Fig. 636 zeigt, eine stärkere Batterie G in den Kreis des Elektromagneten ein und zwar umgekehrt, wie früher (Fig. 633) das Element P eingeschaltet war, und bewegt nun das Band wieder an dem Elektromagneten vorbei. Dadurch wird der ganze frühere Magnetismus vollständig beseitigt und das Stahlband ist wieder magnetisch rein und zur Aufnahme neuer Worte befähigt.

Die Einführung dieses interessanten Apparates (den die Telegraphon-Gesellschaft in Kopenhagen und Krefeld konstruiert) für praktische Zwecke ist noch nicht abgeschlossen; aber die vortreffliche und überraschende Tonwiedergabe, die er zeigt, läßt erwarten, daß er nicht bloß als Kuriosum, sondern als brauchbares Instrument für den geschäftlichen und Zeitungsverkehr eine bedeutende Zukunft vor sich hat. Nach Versuchen im Reichspostamt konnten Telephongespräche, die aus Frankfurt a. M. kamen, in Berlin von einem Telegraphon aufgenommen und klar und deutlich wiedergegeben werden.

Fig. 636.

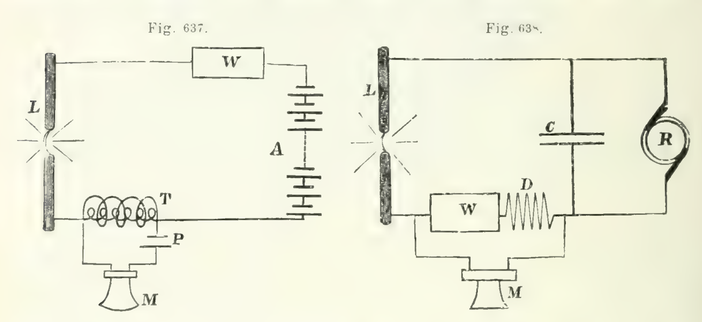
G

E

Eine sehr interessante Erfindung in dem Gebiet der Telephonie ist endlich die der singenden oder sprechenden Bogenlampe, die von Simon gemacht wurde.

Wenn man in ein Mikrophon, das mit einem Element verbunden ist, hineinspricht, so werden ja in der mit dem Mikrophon verbundenen Leitung Ströme von wechselnder Stärke erzeugt. Die sprechende Bogenlampe beruht nun auf der Übereinanderlagerung von Gleichströmen mit diesen wechselnden Strömen. Wenn man, in Fig. 637, von einer Akkumulatorenbatterie A

aus durch einen Vorschaltwiderstand W hindurch den Strom zu einer Bogenlampe sendet, so erhält man in dieser den gewöhnlichen Lichtbogen. Man kann aber in diese Leitung noch einen Transformator einschalten, wie er in der Figur bei T gezeichnet ist, zwei getrennte Drahtspulen, von denen die innere dauernd von dem Akkumulatorenstrom durchflossen ist, während die äußere durch ein Element P mit einem Mikrophon M verbunden ist. Spricht man in das Mikrophon, so werden in diesem Kreis Ströme erzeugt, deren Intensität schwankt, und diese erregen in der inneren Transformatorspule Induktionsströme, welche sich also dem Gleichstrom überlagern und dessen Intensität abwechselnd verstärken und schwächen. Dadurch wird aber auch die Joulesche Wärme, die in dem Lichtbogen auftritt, abwechselnd stärker und weniger stark, der Lichtbogen wird bald



mehr, bald weniger heiß, die Luft, die denselben bildet, dehnt sich bald mehr, bald weniger aus und man erhält also in der Luft periodische Verdünnungen und Verdichtungen. Da diese in demselben Tempo stattfinden, wie die Luftschwingungen, welche in das Mikrophon hineingesprochen oder -gesungen wurden, so müssen also von dem Lichtbogen aus dieselben Töne herausgesprochen oder -gesungen werden. Denn periodische Verdünnungen und Verdichtungen der Luft zeigen sich unserem Ohr als Töne an. Man erhält daher das interessante Resultat, daß die Bogenlampe die Töne wiedergibt, die man in das Mikrophon hineingesprochen hat. Um dieses Experiment recht gut auszuführen, muß erstens der Lichtbogen der Lampe sehr groß sein, statt der gewöhnlichen 2 bis 3 mm vielmehr 5 bis 10 cm, so daß man statt 40 Volt Spannung der Batterie am besten 100 Volt oder mehr zum Betreiben der Bogenlampe anwendet. Zweitens aber ist es auch notwendig, daß die Mikrophonströme selbst sehr stark seien. Man nimmt daher am besten lautsprechende Körnermikrophone. Den langen Lichtbogen erzeugt man dadurch, daß man die Kohlen mit leicht flüchtigen Salzen imprägniert.

Man kann die Apparate, die zu diesen Versuchen notwendig sind, in verschiedener Weise schalten. Am vorteilhaftesten macht man Gebrauch von den entgegengesetzten Eigenschaften der Drosselspulen und Kondensatoren. Die Drosselspulen (oben S. 248) lassen Wechselströme

nur sehr geschwächt durch sich hindurch, während sie Gleichströme nahezu ohne Schwächung passieren lassen, weil ja ihr Widerstand sehr klein ist. Ein Kondensator dagegen läßt einen Gleichstrom nicht hindurch, Wechselströme aber passieren ihn (S. 262). Man kann daher, wie in Fig. 638, von einer Dynamomaschine oder Akkumulatorenbatterie R aus den Lichtbogen speisen, das Mikrophon M aber, ohne besonderes Element, von dieser Leitung abzweigen, so daß man etwa 4 Volt an den Enden des Mikrophons hat, was man durch den eingeschalteten Widerstand W erreichen kann. Man schaltet nun zum Mikrophon noch eine Drosselspule D und parallel zur Lampe eine Leydener Flasche C ein. Dadurch haben sowohl der Gleichstrom wie die Wechselströme ihre bestimmten Wege. Der Gleichstrom geht von der Maschine aus direkt durch die Lampe und durch den Widerstand und die Drosselspule zur Maschine zurück. Die Wechselströme aber, die im Mikrophon erzeugt werden, können sich wegen der Drosselspule nicht durch den Mikrophonkreis selbst ausgleichen, sondern sie müssen durch die Lampe und die Leydener Flasche gehen. Durch die Dynamomaschine gehen sie auch nicht, weil diese hohe Selbstinduktion besitzt. Daher haben sie nur denjenigen Weg, auf welchem sie allein wirken sollen, nämlich durch den Lichtbogen, und werden nicht durch Selbstinduktion geschwächt.

Auf diese Weise kann man eine Bogenlampe so laut sprechen lassen, daß sie in einem großen Raum überall gehört wird, und zwar gibt sie das Sprechen, Pfeifen, Singen und die Töne verschiedener Musikinstrumente sehr gut wieder. Die Töne sind zwar sehr rein, weil es die Luft selber ist, die sie erzeugt, und keine metallische Membran oder dergl. zu Hilfe genommen wird, aber sie werden häufig durch das unbeabsichtigte Zischen des Lichtbogens gestört und verdeckt.

Möglicherweise kann die sprechende und singende Bogenlampe noch manche Anwendung in der Zukunft finden, da sie eben die Töne recht laut wiedergibt. Bisher allerdings hat sie nur die Bedeutung eines interessanten wissenschaftlichen Experiments.

---

15. Kapitel.

Die drahtlose Telegraphie.

Durch nichts wird der rapide Fortschritt, den unsere Kenntnis der Elektrizität und unsere Macht über sie in den letzten Jahrzehnten erfahren haben, so deutlich gekennzeichnet, wie durch den jüngsten Zweig der Elektrotechnik, die drahtlose Telegraphie. Waren doch alle jetzt lebenden Menschen von Jugend auf gewohnt, die Elektrizität stets an die Leitungsdrähte gebannt zu sehen, wußte man doch nichts anderes, als daß man zur Fortleitung der Elektrizität und ihrer Wirkungen stets Metalldrähte anwenden mußte. Und nun wird auch dieses scheinbar notwendigste Hilfsmittel für jede Benutzung der Elektrizität eliminiert und dadurch am deutlichsten manifestiert, wie die wissenschaftlichen Fortschritte in der Kenntnis der Elektrizität auch ganz neue Mittel zu ihrer Benutzung an die Hand geben.

Daß man von der Elektrizität auch Wirkungen in gewisser Entfernung ohne Vermittelung von Drähten erhalten könne, war allerdings schon lange bekannt und die Erscheinungen der Influenz in der Elektrostatik sowie die Induktionserscheinungen der elektrischen Ströme waren die auffallendsten dieser Fernwirkungen. Diese Wirkungen waren allerdings auf sehr kurze Entfernungen beschränkt, aber doch waren dies diejenigen Erscheinungen, aus denen man deutlich erkennen konnte, daß die elektrischen Wirkungen sich nicht bloß durch Drähte, sondern auch durch den Äther, der in der Luft und in allen Körpern enthalten ist, fortpflanzen können. Ladet man einen Körper elektrisch oder sendet man durch einen Draht einen kurzdauernden Strom, so wird auch der umgebende Äther in irgend eine Bewegung versetzt, und diese Bewegung pflanzt sich durch den Äther fort, bis sie einen metallischen Körper trifft, der dann entweder influenziert wird oder in dem ein Induktionsstrom entsteht. Aber allerdings sind die elektrischen Bewegungen, die man so in dem umgebenden Äther erzeugt, so schwach, daß man nur in der nächsten Nähe die fortgepflanzten Wirkungen, die Influenz- oder Induktionswirkungen, erkennen kann.

Durchaus andere Verhältnisse aber treten auf, wenn man es mit sehr rasch wechselnden elektrischen Bewegungen zu tun hat. Je rascher die elektrischen Bewegungen sind, die man etwa in Drähten erzeugt, desto mehr und kräftiger erregen sie auch den umgebenden Äther und erzeugen in diesem ebenfalls periodische Bewegungen, die sich durch das Äthermeer ohne metallische Leitung fortpflanzen. Die drahtlose Telegraphie beruht ganz auf den Entdeckungen von Heinrich Hertz, welcher zuerst gelehrt hatte, rasche elektrische Schwingungen zu erzeugen. Es ist das große Verdienst von Marconi, einem italienischen Ingenieur, daß er mit dem Blick des technischen Erfinders die Anwendbarkeit der elektrischen Wellen für diese Zwecke einsah. Allerdings

konnte man zuerst, als Marconi im Jahre 1896 mit einem System der drahtlosen Telegraphie in die Öffentlichkeit trat und bei einigen Versuchen in England und Italien auf Entfernungen von zirka 3 bis 4 Kilometer wirklich eine telegraphische Übermittelung durch die Luft, ohne Drähte, zustande brachte, nicht sehr große Hoffnungen und Erwartungen auf diese Übermittelung setzen. An eine Ausdehnung dieser Telegraphie auf Hunderte von Kilometern konnte man, auch wenn man genügend Sachkenntnis besaß, nicht wohl glauben. Und nun sind erst 15 Jahre abgelaufen, und schon haben wir einen drahtlosen telegraphischen Verkehr über den ganzen Atlantischen Ozean von England nach Amerika!

Diese staunenswerte Entwickelung einer ganz neuen Technik ist, wie bei jeder Technik, nur dem sorgfältigsten Studium aller einschlägigen Fragen zuzuschreiben. Hier, wie überall, ist zwar die erste Idee das Geniale, aber diese Genialität führt nicht zum Erfolge ohne andauernde fleißige und sorgsame Arbeit an allen Einzelheiten. Außer Marconi selbst, der mit großer Energie sofort jeden neuen Weg eingeschlagen hat, der ihn weiterführen konnte, haben eine große Anzahl in- und ausländischer Gelehrter und Techniker wichtige Fortschritte in diesem Gebiet erzielt, von denen besonders Prof. Braun in Straßburg und Prof. Slaby in Charlottenburg genannt sein mögen, deren Systeme von der Gesellschaft für drahtlose Telegraphie in Berlin, System Telefunken, ausgebildet und in einer sehr großen Zahl von Anlagen ausgeführt wurden.

Wenn zwischen zwei gegenüberstehenden geladenen Leitern ein elektrischer Funke überspringt, so gleichen sich durch diesen Funken die Ladungen nicht ohne weiteres aus, wie man zunächst annehmen könnte, sondern es findet in diesem Funken und in den beiden geladenen Leitern eine hin und her gehende Bewegung der Elektrizität, eine oszillatorische Entladung statt. Daß die Ursache dieser Oszillationen auf den Extraströmen beruht, und daß daher die Periode dieser Oszillationen außer von der Kapazität der Leiter, also der Menge der auf ihnen vorhandenen Elektrizität, noch von dem Selbstpotential der Leiter mit ihren Verbindungsdrähten abhängt, haben wir bereits auf S. 270 gesehen und werden wir nachher noch weiter besprechen. Diese elektrischen hin und her gehenden Bewegungen sind aber nicht durchaus auf das System der beiden Leiter und den Funken beschränkt. Die elektrischen Bewegungen auf den Leitern erregen auch den umgebenden Äther zu ebensolchen hin und her gehenden Bewegungen, und da der Äther überall zusammenhängt, so gehen diese periodischen Bewegungen weiter und breiten sich von dem in oszillatorischer Entladung begriffenen Leiter kugelförmig nach allen Richtungen, soweit kein Hindernis vorliegt, aus. Das war die große Entdeckung von Hertz, und diese Entdeckung wurde noch präzisiert durch die Feststellung, daß die Geschwindigkeit, mit der diese periodischen Bewegungen durch den Äther sich fortpflanzen, eine ganz enorme ist, nämlich gleich der Geschwindigkeit ist, mit der das Licht sich fortpflanzt, daß sie also in jeder Sekunde einen Weg von 300 000 Kilometern zurücklegen.

Wenn nun von einem Funken aus sich die elektrischen Bewegungen wellenartig durch den Äther fortpflanzen, also nach kurzer Zeit an entfernten Stellen ebensolche periodische Bewegungen vorhanden sind, wie in dem Funken selbst, so kommt es nur darauf an, an diesen Stellen

das Vorhandensein der periodischen Bewegungen auch wirklich nachzuweisen. Das einfachste und äußerst empfindliche Mittel dafür ist zunächst der Kohärer (oder Fritter), der von Branly entdeckt wurde und der in Fig. 639 in einer einfachen Form abgebildet ist. Wir haben denselben bereits auf S. 285 beschrieben und dort auch ausgeführt, daß der Kohärer immer mit einem galvanischen Element verbunden ist und daß man auch einfach das jedesmalige Abklopfen des Kohärers automatisch bewirken kann, damit er nach jedem Stromdurchgang von neuem auf ankommende elektrische Wellen reagieren kann. Die lose aneinander liegenden Pulverkörner des Kohärers bei P, welche dem Strom eines galvanischen Elements den Durchgang nicht gestatten, werden durch elektrische Wellen, die auf den Kohärer fallen, aneinander geschweißt und bilden dann eine Leitung für den Strom. Durch den Kohärer zeigen sich daher elektrische Wellen auch in großen Entfernungen von der Erzeugungsstelle an. Und dazu kommt, daß der Kohärer noch die bequeme Form hat, daß er direkt wie ein Relais wirkt. Denn da er in den Stromkreis eines Elements eingeschaltet ist, so kann dieses für sich kräftige Wirkungen ausüben, auch wenn die ankommenden Wellen, durch welche der Kohärer angeregt wird, sehr schwach sind. Am besten legt man, wie es Fig. 640 zeigt, den Kohärer C in den Stromkreis einer schwachen Batterie B und schaltet zu ihm noch ein gewöhnliches Relais R. Durch dieses letztere wird dann ein Lokalstromkreis (mit der Batterie D) geschlossen, sobald der Kohärer durch ankommende Wellen leitend geworden ist. In den Lokalstromkreis kann man eine elektrische Klingel K einschalten, so daß man jede ankommende Welle durch Ertönen der Glocke hört. Man kann aber ebenso auch statt der Klingel oder parallel zu ihr einen Morseschen Schreibtelegraphen *Sch* einschalten. Durch jede ankommende Welle wird der Kohärer leitend, wodurch der Kreis der Lokalbatterie geschlossen wird, und der so entstehende Strom erregt den Elektromagneten des Morseapparats, und der Stift des Apparats schreibt auf dem Papierband die Zeichen. Die Klingel oder der Klopfer dient zugleich dazu, den Kohärer nach jeder Erregung wieder abzuklopfen und zur Aufnahme einer neuen Welle bereit zu machen. Schickt man also nur eine kurz dauernde Welle aus, indem man in der Aufgabestation bloß einen Funken erzeugt, so schreibt der Morseapparat einen Punkt. Schließt man aber in der Aufgabestation den Induktionsapparat längere Zeit, so entstehen eine Reihe von aufeinanderfolgenden Funken, deren Wellen auf

Fig. 639.

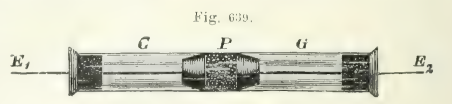
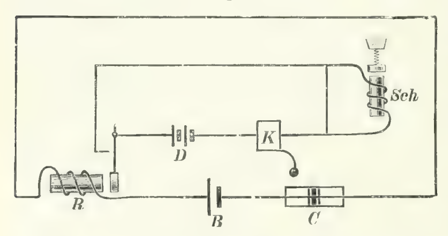


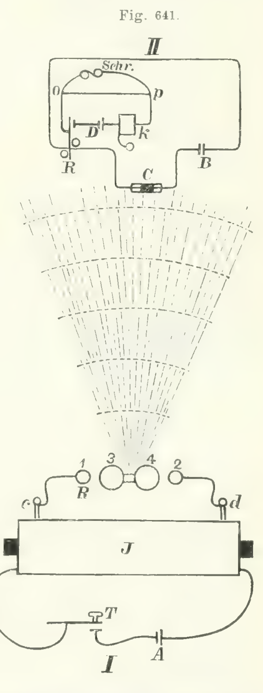
Fig. 640.



den Kohärer fallen, so daß durch den Morseapparat eine Reihe von nahe nebeneinander liegenden Punkten aufgeschrieben werden. Geht das Papierband des Morseapparats genügend langsam, so schließen sich die Punktreihen zu einer Linie zusammen. So erhält man also an der entfernten Station Punkte oder Striche und kann daher mit dem gewöhnlichen Morsealphabet ohne Draht telegraphieren.

Die Anordnung für diese Versuche ist schematisch durch Fig. 641 gekennzeichnet. In der Station I sieht man eine Batterie A, die durch einen Morsetaster T mit den primären Klemmen eines Induktionsapparates J verbunden ist. Die sekundären Pole c und d desselben sind, wie es bei den ersten Versuchen von Marconi der Fall war, zu einem sogenannten Righischen Oszillator R geführt, der aus 4 Kugeln 1, 2, 3, 4 besteht. Die inneren Kugeln 3 und 4 befinden sich in Petroleum. Bei jedem Druck des Tasters entstehen Funken zwischen den Kugeln 1 und 3, sowie zwischen 4 und 2 und auch zwischen 3 und 4, und diese letzteren sind die wirksamen. Durch diese Funken wird der umgebende Äther in Schwingungen versetzt, und diese Schwingungen pflanzen sich, wie es durch die punktierten Linien angedeutet ist, wellenförmig in kugelförmiger Ausbreitung immer weiter fort. An der Station II wird dadurch der Kohärer C erregt, der, wie eben beschrieben, dadurch den Strom von dem Element B durch sich und durch das Relais R hindurchleitet, welches letztere mittels der Lokalbatterie D sowohl den Klopfer K wie den Morseapparat *Schr* in Tätigkeit versetzt. Der Morseapparat gibt also bei jedem einmaligen Niederdrücken des Tasters in I einen Punkt, bei längerem Niederdrücken des Tasters einen Strich.

Fig. 641.



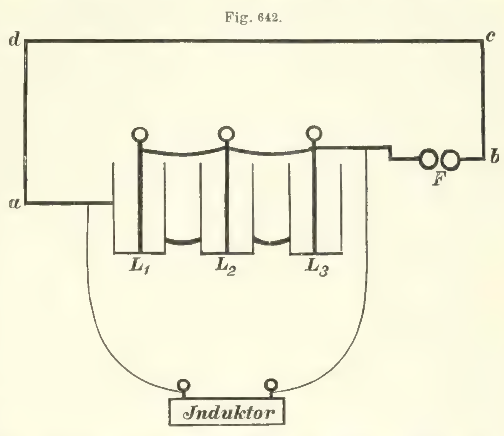
Dies ist das Prinzip der drahtlosen Telegraphie oder, wie man sie auch nennt, der Funkentelegraphie. Indes ist die beschriebene Einrichtung nur ein Laboratoriumsversuch, die Entfernung, auf welche man so direkt mittels dieser Apparate Zeichen geben kann, ist eine ziemlich unbedeutende, sie dürfte unter günstigen Umständen kaum 20 m übersteigen. Zu einer telegraphischen Übermittelung für einigermaßen große Entfernungen eignet sich diese Einrichtung nicht, weil in den kleinen Kugeln des Righischen Oszillators nur geringe elektrische Energiemengen zu Schwingungen veranlaßt werden können und daher die elektrischen Wellen, die sich nahezu kugelförmig ausbreiten, mit wachsender Entfernung rasch so schwach werden, daß sie den Kohärer nicht mehr anregen.

Damit aus diesem Laboratoriumsexperiment eine wirklich brauchbare Technik würde, mußten eine Reihe von sorgfältigen und gründlichen Untersuchungen der hier zu berücksichtigenden Umstände ausgeführt werden. Ohne weiteres ist klar, daß die Wirkungen solcher elektrischer Schwingungen in die Ferne um so größer sein werden, je größer die in schwingende Bewegung gesetzte Energie ist. Nun hängt aber die Größe der elektrischen Energie, die man einem Leiter oder Leitersystem zuführen kann, ab von seiner Kapazität. Je kleiner ein Leiter ist, desto kleiner ist seine Kapazität, desto geringer ist die Elektrizitätsmenge, mit der man ihn laden kann, desto kleiner ist also auch die Energie der Schwingungen, wenn man den geladenen Leiter durch einen Funken entladet. Also wird man vorteilhaft Leitersysteme von großer Kapazität anwenden, um recht kräftige Schwingungen zu erzeugen. Nun besitzen wir aber sehr bequeme Leitersysteme von großer Kapazität in den Kondensatoren und Leydener Flaschen. Man kann durch eine Reihe von parallel geschalteten Leydener Flaschen beliebig große Kapazitäten herstellen und, wie man schon lange weiß, in einer solchen Batterie sehr große Mengen von Elektrizität aufspeichern. Es empfiehlt sich also aus diesem Grunde, die Schwingungen dadurch zu erzeugen, daß man eine Batterie von Leydener Flaschen durch einen Funken entladet. Andererseits aber scheint doch, wenn man das tut, eine wesentliche Abweichung von dem ursprünglichen Plane einzutreten. Nämlich ein solches System von Leydener Flaschen hat, wenn es durch einen Funken in oszillatorische Entladung versetzt wird, eine sehr viel größere Schwingungsdauer als die kleinen Leiter, die bei den Hertzschen Versuchen in Betracht kommen, und namentlich als der oben benutzte Righische Oszillator. Daher sind auch die Wellen, welche diese Kondensatorschwingungen in dem Äther der Luft erregen, sehr viel längere, als sie bei dem Righischen oder Hertzschen Oszillator auftreten. Während diese letzteren Oszillatoren Wellen erregen, die einige Zentimeter oder höchstens, bei den ersten Versuchen von Hertz selbst, 3 m lang waren, bekommen wir hier Wellen, die 200, 300, 500, 1000 m lang sind, je nach der Größe der Leydener Flaschen. In der Tat ist ja (S. 271) die Schwingungsdauer elektrischer Oszillationen um so größer, je größer die Wurzel aus der Kapazität des schwingenden Systemes ist. Und je größer die Schwingungsdauer, um so länger sind die im Äther erzeugten Wellen. Diese Abweichung von dem ursprünglichen Plane — nur sehr rasche Schwingungen anzuwenden — hat aber in Wirklichkeit keine Bedeutung. Man hat durch die Praxis der drahtlosen Telegraphie eingesehen, daß die ursprüngliche Vermutung, man könne nur Wellen von einigen Zentimetern oder Metern Länge benutzen, ganz irrig ist. Die hundertmal so langen oder noch längeren Wellen eignen sich zunächst ebensogut für diesen Zweck und, da man längere Wellen mit größerer Energie versehen kann, sogar noch bedeutend besser. In der Tat sind die Wellenlängen, mit denen heute drahtlos telegraphiert wird, solche, die zwischen 300 und 5000 m liegen; die viel kürzeren eignen sich wegen ihrer geringen Energie nicht für große Entfernungen.

Nach dem Angeführten sollte man also glauben, daß eine Anordnung, wie sie in Fig. 642 gezeichnet ist, unseren Erwartungen entsprechen, zur drahtlosen Telegraphie auf große Entfernungen sich eignen würde. In

dieser sind L_1, L_2, L_3 drei Leydener Flaschen, die parallel geschaltet sind, d. h. deren innere Belegungen miteinander und deren äußere Belegungen miteinander verbunden sind. Durch einen Induktor wird das System der Flaschen geladen und es entladet sich sofort durch einen Funken F, da durch diesen die äußere und innere Belegung miteinander verbunden sind. Dieser Funke ist oszillatorisch und es finden also hin und her gehende Schwingungen in dem ganzen System a b c d statt.

Fig. 642.



Aber eine solche Anordnung hat fast gar keine Fernwirkung; schon in sehr geringem Abstand von dem schwingenden System ist keine Induktionswirkung mehr zu erkennen. Obwohl also Schwingungen in diesem System durch den Funken erzeugt sind, verhalten sich dieselben doch ganz anders wie diejenigen eines Hertzschen oder Righischen Oszillators. Woher kommt dieser Unterschied?

Der Unterschied liegt darin, daß unser System ein geschlossenes ist, während der Hertzsche oder Righische Oszillator ein offener ist. Bei dem Hertzschen Leiter (S. 283, Fig. 276) haben wir zwei gerade Drähte, zwischen denen ein Funke übergeht, ebenso bei dem Righischen Oszillator zwei Kugeln. Hier dagegen haben wir einen nahezu geschlossenen Drahtkreis. Und daß dieser in die Ferne nur eine schwache Wirkung aussenden kann, ersieht man sofort. Denn wenn in dem unteren Teil die Bewegung der Elektrizität z. B. nach rechts von a nach b geht, so geht sie gleichzeitig in c d nach links. An einer entfernten Stelle bringen also diese beiden Teile der Schwingung Induktionen von entgegengesetzter Richtung hervor, welche sich aufheben oder wenigstens schwächen. Und daher folgt: Ein geschlossenes schwingendes System hat keine Fernwirkung, nur ein offenes System erregt den Äther zu fortschreitenden Wellen von erheblicher Stärke.

Also, so scheint es, ist unser System von Leydener Flaschen unbrauchbar für die drahtlose Telegraphie, weil es keine Fernwirkung besitzt, und der einfache Hertzsche Oszillator ist ebenfalls unbrauchbar, weil er zu wenig Energie aufnimmt. Die Anordnung mit den Flaschen besitzt zwar erhebliche Energie, aber keine Ausstrahlungsfähigkeit, die Anordnung mit den Righischen Kugeln besitzt zwar Ausstrahlungsfähigkeit, aber keine erhebliche Energie.

Aber kann man nicht die beiden Methoden vereinigen und so eine Methode schaffen, die die Vorzüge beider besitzt, ohne ihre Nachteile? In der Tat, das ist möglich, und diese Kombination ist es, welche die Fortschritte der drahtlosen Telegraphie hervorgebracht hat. Man muß also ein geschlossenes System mit einem offenen so verbinden, daß die elektrischen Schwingungen in dem geschlossenen System erzeugt werden, aber von dem offenen ausgestrahlt werden. Das kann man erreichen, indem man von dem geschlossenen System die Schwingungen in dem offenen, einem einfachen Draht, induzieren läßt oder indem man den offenen Draht einfach an einen Punkt des geschlossenen Kreises anlegt. Man macht, wie man es nennt, eine *Koppelung* zwischen dem geschlossenen Kreis, den man auch den *Flaschenkreis* nennt, und dem offenen System. Den Draht, von dem dann die Ausstrahlung ausgeht, und über dessen Eigenschaften wir uns gleich unterrichten werden, nennt man auch die *Antenne*. Es ist das Verdienst Marconis, zuerst den Wert solcher Antennen erkannt zu haben.

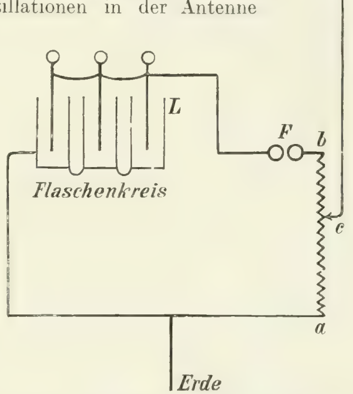
In Fig. 643 sieht man das Schema *einer* solchen Koppelung, die man auch genauer *induktive Koppelung* nennt. In den Flaschenkreis ist eine Drahtrolle, eine primäre Induktionsrolle a a′ eingeschaltet und von dieser wird eine sekundäre Rolle b b′ induziert, deren eines Ende mit der Erde, deren anderes Ende mit der Antenne verbunden ist. Die Rollen b b′, a a′ bilden also einen Transformator, und zwar einen Teslatransformator (da man es mit raschen Schwingungen zu tun hat), den man auch dazu benutzen kann, um die Spannung auf dem Sendedraht beliebig zu erhöhen. Die Schwingungen werden hierbei von dem Flaschenkreis durch Induktion auf die Antenne übertragen. *Eine andere*, und zwar die meist benutzte Art der Koppelung der Antenne mit dem Flaschenkreis, ist in Fig. 644 gezeichnet. Man nennt sie *direkte Koppelung*. Bei dieser enthält der Flaschenkreis eine Reihe von Drahtwindungen a b und an einen Punkt derselben wird die Antenne angelegt.

Fig. 643.

Die Vorgänge bei einer solchen Koppelung zweier Systeme, speziell eines offenen Systemes mit einem geschlossenen, lassen sich leicht übersehen. Ganz so, wie in der Akustik jede Pfeife, jede Trompete, jede Saite ihren Eigenton besitzt, den sie angibt, wenn sie zu Schwingungen angeregt wird, ganz so besitzt auch jedes elektrisch schwingende System

gewissermaßen seinen elektrischen Eigenton, d. h. es führt Oszillationen aus, deren Schwingungsdauer nur abhängt von seiner Beschaffenheit in elektrischer Beziehung. Und zwar sind es, wie wir wissen, die zwei Größen, die Kapazität und die Selbstinduktion, welche für die Dauer der Oszillationen maßgebend sind. Also auch eine solche Antenne besitzt eine gewisse ihr eigentümliche Eigenschwingung, die abhängt von ihrer Kapazität und von ihrer Selbstinduktion. Zu der letzteren gehört auch in Fig. 644 das Drahtsystem c a bis zur Erde. Wenn nun die Antenne durch die Schwingungen des Flaschenkreises angeregt werden soll, so wird das in erheblichem Maße nur dann stattfinden können, wenn die Schwingungsdauer der Oszillationen in der Antenne übereinstimmt mit der Schwingungsdauer der Oszillationen im anregenden Flaschenkreis. Dann findet, wie man es nennt, Resonanz zwischen den beiden Systemen statt. Ganz so, wie eine Klaviersaite, z. B. die dem Ton a entsprechende, zum Tönen angeregt wird, wenn eine a-Stimmgabel ihre Schwingungen auf sie überträgt, weil eben da Resonanz, Übereinstimmung herrscht, ganz so ist es auch bei den elektrischen Schwingungen. Also wird man das offene System so wählen müssen, daß seine Eigenschwingungen denen des Flaschenkreises gleich sind. Man muß, um möglichst große Wirkungen zu bekommen, die Antenne auf den Flaschenkreis, wie man es nennt, abstimmen. Wenn das erreicht ist, dann entstehen auf der Antenne sogenannte stehende Schwingungen. An der Anregungsstelle, d. h. bei c, ist die stärkste elektrische Bewegung vorhanden, dort liegt ein Bauch der Stromstärke, an dem entferntesten Ende der Antenne ist die elektrische Bewegung sehr klein, dort ist ein Knoten der Stromstärke.

Fig. 644.



Diese Verbindung eines Flaschenkreises mit einer Antenne, welche die Vorzüge beider schwingenden Systeme vereinigt, ist eine Erfindung, welche die drahtlose Telegraphie dem Professor Braun in Straßburg i. E. verdankt. Erst durch diese Erfindung, welche auch von Marconi und allen anderen akzeptiert wurde, konnte man in bestimmter Weise die zur Ausstrahlung gelangende Energie beliebig verstärken.

Ebenso wie an der Sendestation befindet sich nun auch in der Empfangsstation eine Antenne, welche die Schwingungen von der entfernten Station aufnimmt und mit ihr ist der Kohärer samt den dazu gehörigen Apparaten verbunden. Der Kreis des Empfangsapparates ist also ebenso

mit der Empfangsantenne gekoppelt wie der Flaschenkreis mit der Sendeantenne.

Die Koppelung eines Empfangsapparates mit der Antenne kann nun auch entweder direkt sein oder induktiv. In Fig. 645 ist eine direkte Koppelung für den Kohärer gezeichnet. Der Empfangsdraht ist durch einen Schiebekontakt an eine Stelle a einer Selbstinduktionsspule S S angelegt. Durch Veränderung der Stellung von a kann man mehr oder weniger solche Windungen an den Luftdraht anlegen. In der Zeichnung sind die Windungen von a bis b an den Luftdraht angeschlossen, von b geht die Leitung des Luftdrahtes über d zum Kondensator K_1 und zur Erde. Es ist also in den Luftdraht bei K_1 auch eine Kapazität eingeschaltet, die auch variiert werden kann. An die Induktionsspule ist nun der Kohärer C mit einem Kondensator K angelegt und durch den Schieber b kann man auch in diesen Kreis mehr oder weniger Selbstinduktion einschalten und so den Schwingungskreis des Kohärers abstimmen auf die Schwingung des Empfangsdrahtes. Noch einfacher wird die Schaltung bei induktiver Koppelung des Kohärers.

Um die verschiedenen Apparate, die zu der drahtlosen Telegraphie gehören, auf den höchsten Grad der Empfindlichkeit zu bringen, müssen alle diese Apparate, Flaschenkreis, Sendeantenne, Empfangsantenne in Resonanz gebracht werden. Dadurch gelingt es, alle Wirkungen sehr viel kräftiger hervortreten zu lassen und überhaupt in vielen Fällen noch Wirkungen zu erzielen, in denen ohne die Anwendung der Resonanz die Wellen ganz unwirksam wären.

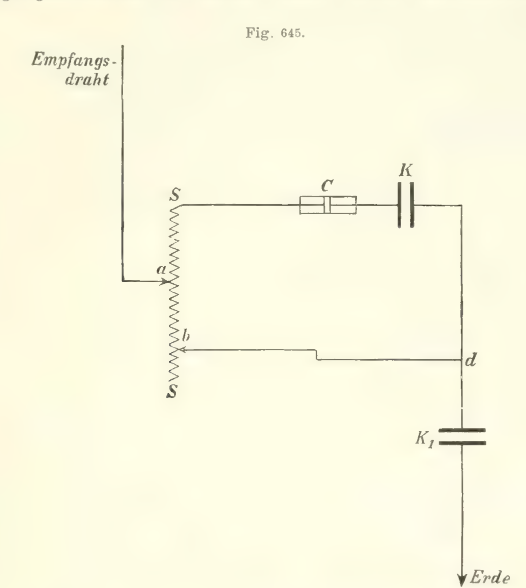
Es muß also die Periode der Eigenschwingung des Flaschenkreises mit seiner primären Transformatorspule ebenso groß sein wie die der Sendeantenne mit ihrer sekundären Spule und ebenso muß die Empfangsantenne mit den mit ihr verbundenen Apparaten dieselbe Periode besitzen wie die Sendeantenne.

Diese Abstimmung wird erreicht, indem man einerseits im primären Flaschenkreis die Kapazität und das Selbstpotential der Drähte reguliert, andererseits an die Antennen noch Drahtwindungen (Selbstpotential) anschließt, von denen man eine größere oder geringere Zahl benutzt und eventuell auch noch einen Kondensator anschließt. Dadurch erteilt man der Antenne eine variable Selbstinduktion, indem man mehr oder weniger Drahtwindungen benutzt, und eine variable Kapazität, indem man den Kondensator verändert, und kann so die Antenne (den Luftdraht) auf jede Schwingungsdauer des Sendekreises abstimmen. Durch derartige variable Kapazitäten und Selbstinduktionen kann man nun aber auch von jeder Sendestation aus mit mehreren Wellenlängen nach Bedarf operieren, bei derselben Antenne, und kann, wenn dieselbe Antenne als Empfangsstation wirken soll, sie auch so regulieren, daß sie mit einer ankommenden Welle in Resonanz steht.

Übrigens ist die Resonanz zweier elektrischer Systeme kein so einfacher Vorgang wie bei den Musikinstrumenten. Wenn man von zwei elektrischen Schwingungskreisen jeden für sich auf eine und dieselbe ganz bestimmte Schwingungsdauer bringt (durch Regulierung der Kapazität und der Selbstinduktion), so daß man also sicher sein könnte, daß sie in vollständiger Resonanz miteinander sind, so findet man, wenn

man sie zusammenkoppelt, so daß sie ein gemeinsames System bilden, daß doch keine Resonanz zwischen ihnen stattfindet, ja man findet sogar, daß in jedem der Schwingungskreise dann nicht mehr bloß eine bestimmte Schwingung vorhanden ist, sondern zwei verschiedene, eine, welche

Fig. 645.



größere, eine andere, welche kleinere Schwingungsdauer hat als die ursprüngliche. Diese Veränderung kommt eben gerade davon her, daß die Systeme miteinander gekoppelt sind, also aufeinander einwirken.

Indes diese Einwirkung mit ihren Folgen kann quantitativ stärker oder geringer gemacht werden, indem man die Koppelung zwischen zwei solchen schwingenden Systemen noch verschieden gestaltet. Man kann die Koppelung eng oder lose machen (oben S. 294 f.).

Bei enger Koppelung des Flaschenkreises und der Antenne, und zwar in induktiver Schaltung werden in Fig. 643 die induzierende Spule des ersten Kreises und die induzierte des zweiten sehr nahe aneinander gebracht. Dabei ist die gegenseitige Induktion sehr groß und die primären Schwingungen werden durch den Sekundärkreis beeinflußt und umgekehrt, jeder Kreis hat nicht eine bestimmte Schwingungsdauer, sondern zwei verschiedene, die um so weiter auseinander liegen, je enger die Koppelung ist. Bei der direkten Koppelung (Fig. 644) ist eine enge Koppelung dann vorhanden, wenn viele Windungen der Rolle a b beiden Systemen gemeinsam sind, wenn also der Anschlußpunkt c der Antenne nach oben, gegen b hin, verschoben ist.

Bei loser Koppelung dagegen ist der sekundäre Kreis so weit vom primären entfernt, daß er zwar noch von diesem induziert wird, aber nicht merklich mehr zurück induziert, dann beeinflußt er also die Schwingungen in dem primären Kreis nicht mehr. Bei der direkten Koppelung muß man in Fig. 644 den Punkt c nach unten hin, gegen a, verschieben, damit die Koppelung möglichst lose sei.

Daß bei loser Koppelung eine Einwirkung des ersten Systemes auf das zweite, aber keine merkliche Rückwirkung des zweiten Systemes auf das erste möglich ist, kann man z. B. wenn die Koppelung induktiv ist, aus folgender Betrachtung erkennen. Induktionsströme entstehen ja nur, wenn die Kraftlinien des induzierenden Kreises den induzierten Draht schneiden. Wenn nun z. B. von 100 Kraftlinien, die von dem ersten System ausgehen, nur 10 den zweiten Kreis schneiden, so werden von der Energie des ersten Kreises 10 Proz. auf den zweiten übergehen. Von dem zweiten gehen dann auf den ersten zurück wieder nur 10 Proz. davon, d. h. die Energie des ersten Kreises wird durch Rückwirkung nur um 1 Proz. geändert.

Während bei enger Koppelung zweier abgestimmter Kreise die beiden entstehenden Schwingungen weit auseinanderliegen in ihrer Schwingungszahl und in der dadurch entstehenden Wellenlänge, werden bei loser Koppelung diese Unterschiede viel geringer. Die Differenz der Wellenlängen der beiden Schwingungen, die durch die Koppelung entstehen, nimmt man direkt als Maß für die Größe, für den Grad der Koppelung und drückt sie in Prozenten aus. Ein Koppelungsgrad von 20 bis 30 Proz. bedeutet eine sehr enge Koppelung, ein Koppelungsgrad von 0 bis 5 Proz. eine sehr lose, von 5 bis 10 Proz. noch immer eine lose Koppelung. Ohne weiteres erkennt man, daß man durch enge Koppelung den sekundären Kreis zwar sehr kräftig anregt, also, akustisch gesprochen, einen sehr lauten Ton erzeugt, durch lose Koppelung dagegen den sekundären Kreis nur schwach anregt, also einen leisen Ton erzeugt. Danach scheint zunächst die enge Koppelung die vorteilhaftere zu sein. Aber das ist doch nicht der Fall und zwar, weil wegen des Auftretens zweier Wellen der Ton bei enger Koppelung zwar laut, aber nicht rein ist, bei loser Koppelung zwar leise, aber dafür rein ist. Je reiner aber der Ton ist, je bestimmter nur eine einzige Schwingungsdauer vorhanden ist, um so schärfer lassen sich alle Resonanzerscheinungen hervorrufen, auf die es bei der drahtlosen Telegraphie ankommt. Man ist daher zunächst gezwungen, von zwei Übeln eines zu wählen: entweder enge Koppelung mit großer Energieübertragung und schlechter Resonanz, oder lose Koppelung mit guter Resonanz, aber geringer Energieaufnahme.

Für die Praxis der drahtlosen Telegraphie entstand aus diesen Ueberlegungen die notwendige Forderung, einfache Mittel anzuwenden, durch welche man die Periode der Eigenschwingungen eines offenen oder geschlossenen elektrischen Systems, das aus Kondensatoren (Kapazitäten) und Selbstinduktionen (Drahtspulen) besteht, messen kann.

Für diesen Zweck dient der von der Gesellschaft für drahtlose Telegraphie gebaute Wellenmesser, ein Apparat, welcher die elektrischen Wellenlängen, die jedes System gibt, einfach zu bestimmen gestattet. Der Apparat beruht ebenfalls auf der Anwendung der Resonanz und

besteht aus einem Drehkondensator, dessen Kapazität in weiten Grenzen einfach verändert werden kann, und aus einigen Spulen mit Selbstpotential. Der Drehkondensator, der in Fig. 646 abgebildet ist, ist derselbe, den wir auf S. 30 schon besprochen haben. Zu dem Kondensator gehört ein Satz von Drahtringen, die verschiedene Selbstinduktion besitzen, wie in Fig. 647 zwei abgebildet sind. Gewöhnlich gehören zu jedem Apparat fünf solche Drahtkreise abgestufter Selbstinduktion. Ein solcher Ring wird durch eine Drahtschnur mit dem Drehkondensator verbunden. Wird nun ein solcher Ring s einem Drahtkreis gegenübergestellt, in welchem elektrische Schwingungen stattfinden, so wird er selbst durch Induktion (und zwar bei l o s e r K o p p e l u n g) zu Schwingungen erregt. Um die Stärke dieser Schwingungen zu messen, wird, wie Fig. 648 zeigt, eine Schaltung so gemacht, daß in den Kreis von Selbstinduktion J und Drehkondensator D.K. noch eine „K o p p e l u n g s s p u l e“ geschaltet wird,

Fig. 646.

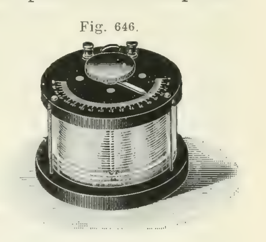
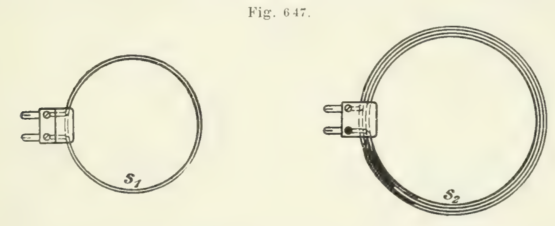
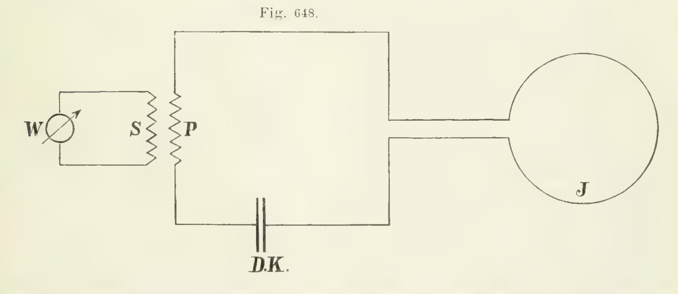


Fig. 647.



die aus einer primären Drahtrolle P und einer sekundären S besteht. Letztere ist mit einem Hitzdrahtwattmeter W verbunden. Die Ausschläge dieses Wattmeters geben direkt ein Maß für die Energie der in

Fig. 648.

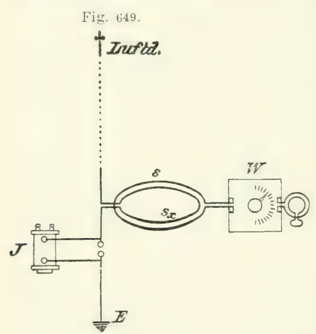


diesem System verlaufenden Schwingungen. Je stärker die Schwingungen in dem Wellenmesser sind, desto größer ist der Ausschlag des Wattmeters. Ist der Wellenmesser also von einem schwingenden System angeregt und

ist er mit diesem in Resonanz, so erreicht dieser Ausschlag ein Maximum. Man kann nun ein für allemal durch Eichung vorher feststellen, welcher Periode, also welcher Wellenlänge jede Stellung des Kondensators bei jeder von den fünf eingeschalteten Spulen entspricht. Die Dimensionen des Wellenmessers sind so abgemessen, daß mit der kleinsten Selbstinduktion und der kleinsten Kapazität die Eigenschwingung des Wellenmessers einer Wellenlänge von 120 m entspricht. Vergrößert man die Kapazität nun bis zum Maximum (bei Anwendung derselben Rolle s_1), so vergrößert sich die entsprechende Wellenlänge bis zu 280 m. Die zweite Selbstinduktion s_2 ist so abgemessen, daß sie bei der kleinsten Kapazität 250 m Wellenlänge ergibt. Durch Drehung der Kondensatorplatten kann man dann die Wellenlänge bis 570 m verändern und ebenso erlauben die weiteren Selbstinduktionen Wellenlängen bis zu 2900 m einzustellen. Man kann die entsprechende Wellenlänge direkt an dem Teilkreis des Drehkondensators ablesen.

Bei der Anwendung des Instrumentes zur Messung der unbekannten Wellenlänge, welche in einem beliebigen schwingenden System herrscht, geht man folgendermaßen vor. Es sei z. B. die Wellenlänge zu messen, die in einem Luftdraht (Antenne), wie in Fig. 649, herrscht, der durch die Funkenstrecke des Induktionsapparates J zu Schwingungen angeregt wird. Man schaltet in die Antenne eine einzige Drahtwindung s_x ein, die die Schwingung nicht wesentlich beeinflußt. Dieser Drahtwindung stellt man die Selbstinduktion s des Wellenmessers W in passendem Abstand gegenüber, nämlich so, daß lose Koppelung stattfindet und ändert nun die Kapazität des Drehkondensators resp. auch die Selbstinduktion s so lange, bis das Wattmeter den größten Ausschlag macht. Dann ist der Wellenmesser in Resonanz mit dem Luftdraht und die an der Skala des Wellenmessers abgelesene Wellenlänge ist zugleich die der Antenne.

Fig. 649.

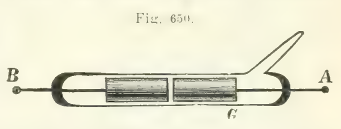


Durch diesen Apparat ist die A b s t i m m u n g aller Teile einer Einrichtung für drahtlose Telegraphie aufeinander leicht geworden.

Wenn man nun aber den Sendeapparat durch Anwendung des Flaschenkreises und der Antennen befähigt hatte, möglichst große Energiemengen in Form von elektrischen Wellen auszustrahlen und durch die Abstimmung der Apparate und Erzielung der Resonanz diese auch in verhältnismässig grosser Menge an der Empfangsstation erhielt, so kam es weiter bei dem Empfangsapparat darauf an, ihn möglichst empfindlich zu machen. Denn wie groß auch die von der Sendestation ausgestrahlten Energiemengen sind, bei einigermaßen entfernten Empfangsstationen kommt doch nur ein geringer Bruchteil derselben an den dortigen Empfangsapparat heran. Daher ist es die erste Aufgabe, den wellenanzeigenden Apparat möglichst empfindlich zu machen und ihn so anzubringen, daß er von den ankommenden Wellen am besten angeregt wird.

Als Empfangsapparat diente bis vor wenigen Jahren in den meisten Fällen der Kohärer oder Fritter. Er ist ein äußerst empfindliches Instrument und hat noch, wie erwähnt, die Eigenschaft, daß er bequem als Relais wirkt. Um seine Empfindlichkeit möglichst groß zu machen, hat man ihn mit besonderer Sorgfalt konstruiert, und es sind eine große Anzahl von verschiedenen Konstruktionen für ihn angegeben worden. Es kam auch wesentlich darauf an, die Unsicherheit, die der Kohärer gewöhnlich bot, indem er bald gar nicht ansprach, bald nicht mehr zu beruhigen war, wenn er einmal angeregt war, zu beseitigen. Der Kohärer hat häufig die in Fig. 650 angegebene Form. In eine Glasröhre G von etwa 5 cm Länge und 3 bis 4 mm innerem Durchmesser sind zwei Silberzylinder gesteckt, die nahezu dicht die Röhre ausfüllen. Der Zwischenraum zwischen den Endflächen (die manchmal abgeschrägt werden), beträgt nur 0,5 mm und ist mit Feilspänen gefüllt. Nach Marconi erhält man die beste Wirkung durch eine Mengung von 96 Proz. Nickelspänen und 4 Proz. Silberspänen. Die Größe der Körner, die sorgfältig sortiert werden, soll möglichst einheitlich und eine mittlere, nicht zu klein, nicht zu groß sein. Die sorgfältige Auswahl der Körner bestimmt wesentlich die Güte des Kohärers. Die Luft wird in der Glasröhre stark verdünnt, auf etwa 1 mm Druck, und die Röhre dann zugeschmolzen. Die empfindlichsten Kohärer sind nach neueren Erfahrungen solche, die Goldpulver zwischen Aluminiumelektroden enthalten.

Fig. 650.

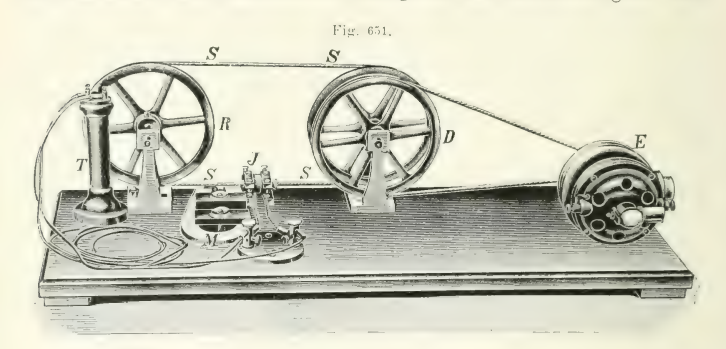


Lange Zeit war der Kohärer das einzige empfindliche Reagenzmittel auf elektrische Wellen, das man kannte. Jedoch sind im Laufe der Zeit einige andere solche Reagenzmittel erfunden worden, die man als Wellenindikatoren oder Wellendetektoren bezeichnet und von denen manche erhebliche Vorzüge vor dem Kohärer haben, so daß heute der Kohärer aus der Praxis der drahtlosen Telegraphie verschwunden ist.

Elektrische Wellen haben nämlich, wie zufällig entdeckt wurde, eine ganz eigentümliche Wirkung auf den Magnetismus von Stahlnadeln. Wenn man den Magnetismus einer Stahlnadel allmählich vergrößert oder verkleinert, indem man z. B. einen induzierenden Magneten ihr nähert oder entfernt, so nimmt wegen der Hysteresis (S. 169) die Stahlnadel nicht sofort den ihr zukommenden Magnetismus an, sondern sie bleibt hinter demselben zurück. Wenn nun aber auf eine solche Stahlnadel, deren Magnetismus zurückgeblieben ist, elektrische Wellen fallen, so nimmt dieselbe sofort den wirklichen, ihr zukommenden Magnetismus an. Das ist eine Wirkung der Wellen und eine Eigenschaft des Stahls, die man nicht voraussehen konnte, sondern die durch den Versuch sich ergeben hat. Es ist so, als ob die Wellen die Moleküle des Eisens erschüttern und dadurch die Koerzitivkraft, welche die Ursache der Hysteresis ist, aufheben. Dieses Phänomen hat nun Marconi zur Konstruktion eines magnetischen Detektors in einer Weise verwendet, welche aus Fig. 651 hervorgeht. Statt einen Magneten vor einem Stahldraht zu bewegen, bewegt er dabei vielmehr einen Stahldraht vor

einem Magneten. Ein Stahldraht S ohne Ende läuft über zwei Rädern, dem Rad R und dem hinteren von D. Das vordere Rad D wird durch einen Elektromotor E mittels Schnurübertragung angetrieben, so daß der Stahldraht dabei dauernd sich bewegt und auf seinem Wege an den

Fig. 651.



Polen des Magneten M vorbeipassiert. Dort wird er magnetisch, aber infolge der Hysteresis nicht vollständig. Er läuft dann durch die Höhlung eines kleinen Induktionsapparates J, dessen primäre Rolle einerseits mit der Antenne, andererseits mit der Erde verbunden ist, während die sekundäre mit dem Telephon T in Verbindung steht. Durch jede an die Antenne ankommende Welle wird die Hysteresis des Stahldrahts aufgehoben, die Magnetisierung des Drahts wird plötzlich geändert und das Telephon gibt ein knackendes Geräusch. Dieser magnetische Detektor ist von Marconi bei seinen Anlagen, die auf große Entfernung wirken sollen, dem Kohärer vorgezogen worden. Er wirkt sehr exakt. Der einzige Übelstand, den er besitzt, ist der, daß er nicht mit einem Morseschreibapparat, sondern nur mit einem Telephon verbunden werden kann, daß man also die Zeichen mit ihm nur hören, nicht lesen kann.

Ein anderer Wellenindikator ist 1903 von Schlömilch erfunden worden und beruht wieder auf einer ganz anderen, auch noch nicht vollständig erklärten Wirkung der Wellen. Wenn man eine gewöhnliche Polarisationszelle (S. 150) hat, die aus verdünnter Säure als Flüssigkeit und zwei Elektroden aus Platin oder Gold besteht, so hat diese ja ein gewisses Maximum der Polarisation. Wenn man nun als polarisierende Batterie eine solche nimmt, deren elektromotorische Kraft nur um weniges höher ist als dieses Maximum, so findet eine ganz schwache elektrolytische Zersetzung der Flüssigkeit statt, an der einen Elektrode entwickelt sich Sauerstoff, an der anderen Wasserstoff und es geht also ein schwacher Strom durch die Zelle. Macht man nun die eine Elektrode, und zwar diejenige, an der sich Sauerstoff entwickelt, sehr klein, so zeigt sich, daß diese Gasentwickelung und dieser Strom deutlich beeinflußt werden durch elektrische Wellen, die auf die Zelle fallen. Sobald eine Welle auftrifft, wird der hindurchgehende Strom stärker, und es findet eine lebhaftere Gasentwickelung an der kleinen Sauerstoffelektrode statt. Die andere Elektrode kann beliebige

Größe haben. Auch für dieses Phänomen ist die Ursache nicht genau bekannt, es scheint, daß auch hier wie bei dem Kohärer ein Übergangswiderstand durch die Wellen beseitigt wird. Aber unabhängig von der Erklärung sieht man, daß man dadurch in einer solchen Zelle wieder einen Wellenindikator besitzt. Man bezeichnet ihn als elektrolytischen Detektor. Fig. 652 stellt einen solchen Detektor dar. In einem Glasgefäß befindet sich verdünnte Schwefelsäure. In dasselbe taucht ein dickerer Platindraht N, der Kathode wird, und ein sehr dünner in einer Glasröhre befindlicher Platindraht (Wollastondraht) P, der Anode wird. Von P ist nur ein ganz winziges Stück außerhalb der Glasröhre. Der

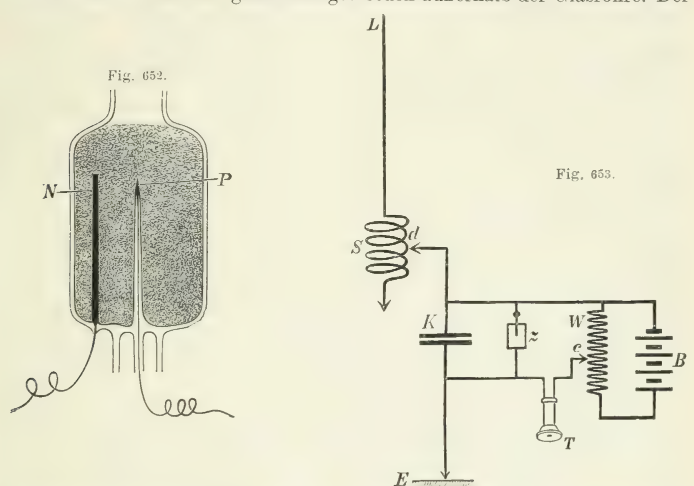


Fig. 652.

Fig. 653.

Draht hat nur $^1/_{1000}$ mm Durchmesser und ragt nur um $^1/_{100}$ mm aus dem Glasrohr hinaus. Die Art und Weise, wie eine solche Zelle an Stelle des Kohärers als Empfangsapparat an die Empfangsantenne angeschlossen wird, zeigt Fig. 653. Die elektrolytische Zelle ist durch z dargestellt. Eine Batterie B von 4 Akkumulatoren ist nicht direkt mit der Zelle z zusammengeschaltet, sondern durch einen großen Widerstand W geschlossen, von dem man mittels des Gleitkontaktes c den Strom abzweigen kann. Die Zelle z wird also von diesem abgezweigten Strom — dessen Spannung man dadurch leicht verändern und regulieren kann — gespeist. Andererseits ist die kleine positive Elektrode der Zelle mit der Antenne L verbunden, indem man von der Antenne, resp. von einigen Drahtwindungen S, die mit ihr verbunden sind, durch den Kontakt d die Wellen ihr zuführt. In dem Stromkreis der Zelle liegt nun direkt ein Telephon T. Durch jede ankommende Welle wird das Telephon erregt und man hört so die einzelnen Morsezeichen.

Dieser elektrolytische Detektor wirkt ausgezeichnet exakt, wenn die positive Elektrode sehr kleine Oberfläche hat, aber man ist

auch bei ihm auf das Telephon angewiesen, erhält also keine schriftlichen Telegramme, was jedoch in der Praxis kein wesentlicher Nachteil mehr ist. In den Laboratorien wird er gewöhnlich zur Abstimmung der einzelnen Teile einer Anlage benutzt.

Den größten Fortschritt aber haben die letzten Jahre durch die Erfindung der sogenannten Thermodetektoren und Kontaktdetektoren gebracht. Das sind Thermoelemente, aus zwei Leitern bestehend, die sich möglichst in einem Punkte unter leichtem Druck berühren. Durch Auftreffen auch sehr schwacher Wellen reagieren sie, erzeugen sie einen Thermostrom und geben in einem Telephon ein knackendes Geräusch. Als sich berührende Stoffe nimmt man bei den Thermodetektoren einerseits ein Metall, andererseits Stoffe wie Graphit, Bleiglanz, Schwefelkupfer, Mangansuperoxyd u. s. w. Bei den Kontaktdetektoren berührt sich gewöhnlich Graphit mit einem Mineral wie Psilomelan. Beide Arten Detektoren wirken zunächst bloß auf das Telephon, nicht auf ein Relais.

Diese verschiedenen Arten von Wellenempfängern, und es gibt deren noch andere, unterscheiden sich untereinander hauptsächlich in einem Punkte, der für die Praxis von besonderer Bedeutung ist. Damit ein Kohärer — und ebenso ein magnetischer Wellendetektor — anspricht, muß von den ankommenden Wellen jede mindestens eine bestimmte Energie besitzen. Nur wenn ein bestimmtes Mindestmaß bei einem einzelnen Anstoß vorhanden ist, wird der Kohärer leitend. Es genügt nicht, daß eine Reihe von nacheinander ankommenden Wellen zusammen eine größere Energiemenge enthalten. Der Kohärer summiert nicht die aufeinanderfolgenden Anstöße, sondern er wird entweder angeregt, wenn eine von diesen Wellen genügend große Energie besitzt, oder er wird überhaupt nicht angeregt. Der Kohärer und ebenso der magnetische Detektor sind, wie man es nennt, keine addierenden Apparate.

Dagegen ist ein Thermodetektor — und ebenso auch der elektrolytische und der Kontaktdetektor — ein addierender Apparat. Es kommt beim Thermodetektor darauf an, daß die eine Kontaktstelle eine etwas höhere Temperatur bekommt wie die andere. Diese erhält sie aber auch, wenn eine Reihe von schwachen Wellen hintereinander auf sie fallen. Denn jede führt dem Detektor ihre Energie in Form von Wärme zu und diese Wärmemengen addieren sich. Daher kann ein Thermodetektor auch derartig schwache Wellen anzeigen, wenn sie nur in genügender Zahl an ihn herantreten, auf die ein Kohärer unter keinen Umständen mehr reagiert.

Während es, wenn man einen Kohärer an der Empfangsstation anwendet, darauf ankommt, jedesmal eine einzige Schwingung oder einige wenige, aber von verhältnismäßig großer Energie, an die Empfangsstation zu senden, ist es bei der Benutzung eines Kontakt- oder Thermodetektors angebracht, eine größere Anzahl von Schwingungen, wenn auch von geringer Energie, für jedes telegraphische Zeichen anzuwenden.

Die neueste Entwicklung der drahtlosen Telegraphie benutzt gerade diese zweite Methode. Der Kohärer ist deswegen heute aus der Praxis der drahtlosen Telegraphie völlig verschwunden, es werden jetzt nur noch addierende Detektoren angewendet.

Wir haben oben von der Wichtigkeit der Abstimmung aller Apparate

aufeinander gesprochen und gefunden, daß man bei fester Koppelung, die sich zunächst wegen der großen Energieübertragung empfiehlt, nicht eine, sondern zwei Wellen erhält, die für die Abstimmung ungünstig sind, während man bei loser Koppelung zwar geringe Energieübertragung aber nur eine einzige Welle erhält, die für die genannte Abstimmung vorteilhafter ist.

Die Schärfe der Abstimmung eines elektrischen Kreises auf einen anderen aber hängt noch wesentlich von einem anderem Umstand ab, nämlich von der sogenannten Dämpfung der Wellen in den Leitern. Die elektrische Energie der Wellen, die in einem Leiter hin und her oszillieren, wird durch den Widerstand des Leiters allmählich in Joulesche Wärme umgewandelt, wodurch die Wellen selbst aufhören. Je geringer der elektrische Widerstand ist, desto mehr Wellen folgen aufeinander, je größer er ist, desto rascher werden die Wellen, die anfangs erhebliche Intensität haben, mehr und mehr geschwächt, bis sie unmerklich sind. Man sagt, die Schwingungen sind gedämpfte. Sind aber die Schwingungen in einem Kreis gedämpfte, so kann man einen zweiten Kreis nicht scharf auf Resonanz mit ihm abstimmen. Denn nur eine größere Anzahl gleich kräftiger Schwingungen, welche an den abzustimmenden Kreis ankommt, erregt ihn so, daß seine Eigenschwingung sich voll ausbildet. Sind die ankommenden Schwingungen aber gedämpft, so daß nur eine oder wenige Schwingungen in gleicher Stärke aufeinander folgen, so wird die erzeugte Resonanzschwingung nur ein wenig ausgeprägtes Maximum besitzen, und daher ist eine scharfe Resonanzabstimmung nicht möglich. In den Schwingungskreisen, die in der drahtlosen Telegraphie gebraucht werden, liegt der größte elektrische Widerstand immer in der Funkenstrecke selbst. Durch den Funken, der die Schwingungen erst erzeugt, tritt auch sofort der Feind der Schwingungen, nämlich die Dämpfung auf. Die Wellen, die durch den Funken erregt werden, sind also gedämpfte Wellen und das Hervorbringen der gewünschten Resonanz ist um so weniger möglich, je stärker diese Dämpfung ist.

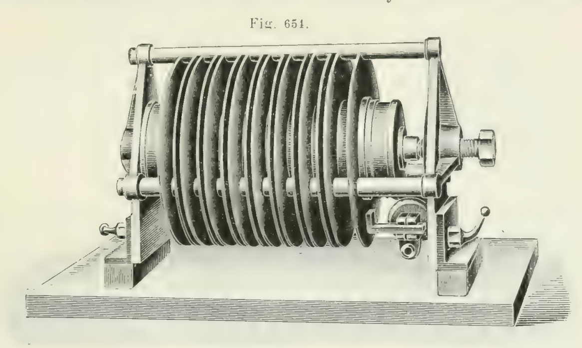
Ein idealer Zustand also für die abgestimmte drahtlose Telegraphie wäre es, wenn man mit ungedämpften oder wenigstens mit sehr wenig gedämpften Schwingungen arbeiten könnte. Da nun der Funke, der die Schwingungen erzeugt, immer zugleich starke Dämpfung einführt, so schien es zunächst, als ob man dieses Ideal nur erreichen könne, wenn man ganz vom Funken abgehen, also eine ganz andere Art der Erregung von Schwingungen einführen würde, wenn man die raschen Schwingungen auf andere Weise als durch einen Funken erzeugen würde.

Und doch zeigte es sich, daß man auch im Gebiet der technischen Fortschritte nicht immer in die Ferne zu schweifen braucht, sondern daß das Gute auch hier manchmal sehr nahe liegt, daß man auch mit den bisher angewendeten Mitteln, bei leichter Veränderung, statt der mehr oder minder stark gedämpften Schwingungen solche mit äußerst geringer Dämpfung erzeugen kann, annähernd von den idealen Eigenschaften, wie man sie lange suchte. Auch hier wieder war es ein sorgfältiges Studium aller Einzelheiten, welches den Fortschritt ermöglichte. Der elektrische Funke selbst ist es ja, der zwar die Schwingungen erzeugt, sie selbst aber durch den Widerstand, den er besitzt, auch wieder dämpft. In einem

Flaschenkreis mit Funkenstrecke verlaufen daher ziemlich stark gedämpfte Schwingungen, die in einer fest gekoppelten Antenne, wie besprochen, zwei Schwingungen von verschiedener Schwingungsdauer erzeugen würden. Der Widerstand der Funkenstrecke ist zwar so groß, daß er erhebliche Dämpfung hervorbringt, aber doch nicht groß genug, daß er etwa die Schwingungsfähigkeit des Flaschenkreises sofort ganz unterbindet. Nun aber ist der Widerstand der Funkenstrecke um so größer, je kleiner die Stromstärke ist — offenbar wegen der geringeren Erwärmung. Wenn man aber ganz kleine Funken benutzt, also geringe Stromstärke anwendet, so wird tatsächlich bald nach Ablauf der ersten Schwingung der Widerstand so groß, daß der Flaschenkreis nicht mehr weiter schwingt. Man hat also bei Anwendung solch kleiner Funken das merkwürdige Resultat, daß der Flaschenkreis nur eine einzige kräftige Schwingung macht und dann ruhig, stumm bleibt. Ist mit dem Flaschenkreis nun eine Antenne eng gekoppelt, so wird sie durch die eine Schwingung des Flaschenkreises selbst zu elektrischen Schwingungen angeregt und schwingt nun, auch wenn der Flaschenkreis stumm bleibt, weiter mit der ihr eigentümlichen Periode. Die Schwingungen einer Antenne allein aber sind sehr wenig gedämpft, weil die Antenne bloß aus guten Leitern, ohne Funkenstrecke, besteht. Man sieht, daß man auf diese Weise mittels sehr kleiner Funken tatsächlich eine Antenne zur Ausstrahlung sehr wenig gedämpfter Schwingungen bringen kann. Der Flaschenkreis gibt bloß der Antenne den ersten Anstoß, dann schwingt sie weiter. Man nennt deswegen diese Methode die Methode der Stoßerregung. Die kleinen Funken, welche diese wichtige Erscheinung hervorbringen, nennt man Löschfunken. In diesen Löschfunken hat man also ein sehr einfaches und vorteilhaftes Mittel gefunden, um von der Sendestation aus sehr wenig gedämpfte Schwingungen in den Raum hinaus zu senden. Schwingungen, mit denen sich die Empfangsapparate leicht und mit Schärfe zur Resonanz bringen lassen. Sowohl ausländische Gesellschaften für drahtlose Telegraphie, wie auch die Deutsche Telefunkengesellschaft haben die Anlage von Sendern nach diesem System der Stoßerregung sofort akzeptiert und damit sehr gute Resultate erzielt. Dieses System besitzt aber in seiner Durchführung noch eine Reihe weiterer Vorzüge. Da nämlich der Flaschenkreis gleich nach der ersten Schwingung ruhig bleibt, so kann man nun in jeder Sekunde sehr viel solche Löschfunken erzeugen, mehrere hundert, und jede wird die Antenne von neuem zu Schwingungen anregen. Mehrere hundert solcher Funken, d. h. mehrere hundert Ladungen und Entladungen geben aber einen musikalischen Ton von bestimmter Höhe, die Funken tönen. Man bezeichnet deswegen ein solches System als das System der tönenden Funken. Mit demselben musikalischen Ton, aber allerdings unhörbar, werden nun die Wellen von der Antenne ausgesendet, sie treffen mit demselben Ton die Empfangsstation und wenn sie dort durch einen Detektor mit einem Telephon aufgenommen werden, so hört man in diesem die gegebenen Zeichen tatsächlich in derselben Tonhöhe. Werden 500 Funken pro Sekunde benutzt oder 1000, so hört man die Zeichen an der Empfangsstation das zweite Mal in der höheren Oktave als das erste Mal. Es ist zu beachten, daß natürlich es nicht die elektrischen Wellen sind, welche hörbare Töne erzeugen, sondern nur das

Tempo, in welchem die Wellen immer wieder von neuem erzeugt werden. An der Sendestation muß man also bei diesem System nur kleine Funken,

Fig. 654.



Löschfunken, anwenden. Damit man aber trotzdem große Energiemengen anwenden kann, hat die Telefunkengesellschaft die Funkenstrecke so ausgebildet, wie es Fig. 654 zeigt. Dieselbe besteht aus einer mehr oder minder großen Zahl von Einzelfunkenstrecken, die hintereinander geschaltet sind. Die einzelnen Funkenstrecken sind ringförmig gebildet. Das Material der Funkenstrecken ist Kupfer oder Silber, damit durch die gute Wärmeleitungsfähigkeit das Löschen begünstigt wird. Der Funke setzt irgendwo auf der Fläche der Ringfunkenstrecke ein und wird durch die magnetischen Kräfte des Stromes rasch radial nach außen geblasen. Die große Fläche für die Funken ist auch deswegen gewählt, damit die Temperatur niedrig bleibt, weil dadurch die Funken rasch erlöschen.

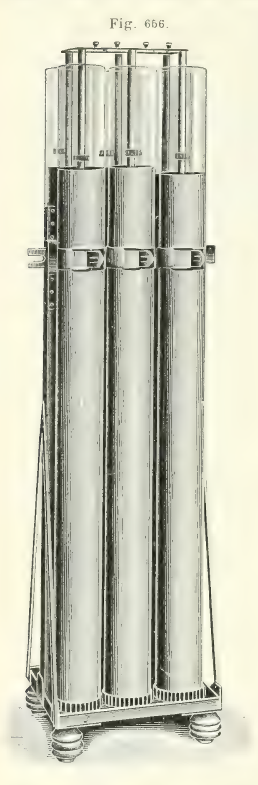
Fig. 655.

In der Praxis der drahtlosen Telegraphie kommt es nun darauf an, nicht nur mit einer einzigen Wellenlänge zu arbeiten, sondern die Möglichkeit zu haben, mit verschiedenen Wellenlängen zu telegraphieren und Depeschen, die mit verschiedenen Wellenlängen gesendet werden, zu empfangen. Das ist zunächst für den Empfänger wichtig, da dieser, wenn er z. B. auf einem Schiff sich befindet, von verschiedenen Stationen, die mit verschiedener Wellenlänge arbeiten, die Telegramme aufnehmen soll. Es ist aber auch für den Sender von Wichtigkeit, unter Umständen mit verschiedener Wellenlänge arbeiten zu können, um die ausgesendeten Depeschen von anderen, die gleichzeitig aus anderen Quellen das Äthermeer durcheilen, unterscheiden zu lassen.

Um solche Veränderlichkeit in den Wellenlängen hervorzubringen, muß man variable Kondensatoren und variable Selbstinduktionen besitzen. In dem geschlossenen Kreis des Senders und in dem auf ihn abgestimmten offenen Kreis der Antenne erzeugt man durch solche variable Selbstinduk-

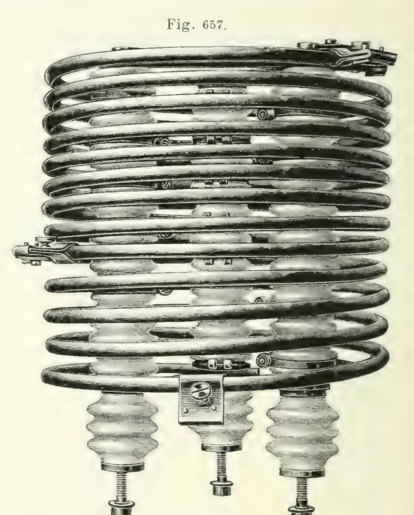
tionen und Kapazitäten beliebige Wellenlängen. Als Kapazitäten benutzt man immer Batterieen von Leydener Flaschen verschiedener Größe und Zahl. Fig. 655 zeigt eine solche Flasche von etwa 1,3 m Länge, die mit Staniol innen und außen belegt ist. Jede Flasche hat eine Kapazität von etwa 12000 cm (oben S. 31). Eine Reihe solcher Flaschen wird, wie Fig. 656 zeigt, in einem Gestell vereinigt, so daß man leicht eine Anzahl Batterieen parallel oder in Serie schalten kann.

Fig. 656.



Die Drahtwindungen, welche die Selbstinduktion des Flaschenkreises bilden, nehmen für die großen Stationen mit ihren gewaltigen Energiemengen enorme

Fig. 657.

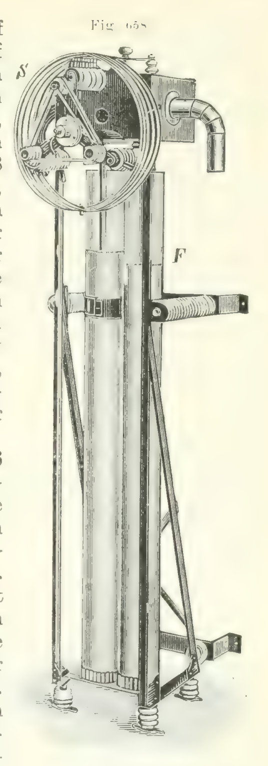


Verhältnisse an. Fig. 657 zeigt eine solche Selbstinduktion, die aus versilberten Kupferrohrspiralen besteht und an drei Säulen aus Porzellan befestigt wird. Die Spiralen haben drei verstellbare Anschlußstücke, zwei für die Leitung von der Flaschenbatterie und Funkenstrecke, eines für den Luftleiter. Je nachdem mehr oder weniger von der ganzen Länge der Selbstinduktionsdrähte eingeschaltet werden, ist die Wellenlänge des Senders verschieden.

Um den Sender zu betreiben, wird Wechselstrom benutzt. Man unterscheidet die Größe der Stationen nach der Zahl der Kilowatt, welche von der Senderantenne aufgenommen werden. Die mittelgroßen Stationen sowohl an Land wie auf Schiffen haben Sender von 1 bis 2,5 Kilowatt,

die kleinen Stationen gehen herunter bis auf 0,2 Kilowatt, die ganz großen Stationen herauf bis auf 25 und mehr Kilowatt. Bei einer Station von 1,5 Kilowatt, wie sie auf Handelsdampfern und in kleineren Landstationen installiert wird, enthält der Flaschenkreis zwei solche Flaschen und die Selbstinduktionsspule, die wie in Fig. 658 zusammengebaut sind. F sind die Flaschen, S ist die Selbstinduktion. Der Wechselstrom der Maschine wird durch einen Transformator auf 8000 Volt transformiert und dem Sender zugeführt. Durch drei verschiedene Anschlüsse an der Selbstinduktionsrolle erhält man dann drei feste Wellenlängen von 300, 450 und 600 m. In anderen Fällen, bei großen Stationen, macht man die Selbstinduktion nicht sprungweise, sondern kontinuierlich variabel, durch das sogenannte Variometer, von dem wir hier aber nicht sprechen wollen.

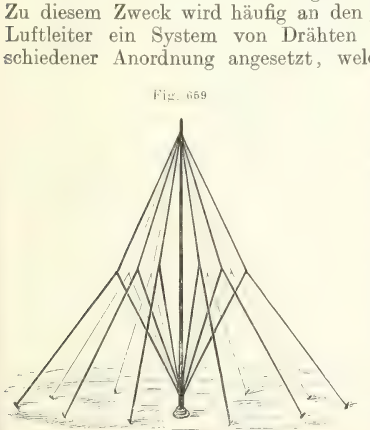
Fig. 658.



Von dem Flaschenkreis des Senders muß nun die Energie auf die Sendeantenne übertragen werden, und zwar wird die Antenne bei dem System der tönenden Funken ziemlich eng gekoppelt, wodurch eben große Energiemengen auf die Antenne übertragen werden.

Die Luftdrähte, die Antennen, bildet man gewöhnlich nicht mehr aus einem einfachen Draht, sondern man gibt ihnen verschiedene Formen, durch welche ihre Kapazität in mehr oder minder hohem Maße vergrößert wird. Zu diesem Zweck wird häufig an den geraden Luftleiter ein System von Drähten in verschiedener Anordnung angesetzt, welche zusammen eine große Kapazität besitzen. Namentlich wenn diese Drähte von der Spitze des Luftleiters nach dem Boden führen und dann in der Nähe des Bodens verlaufen, wird die Kapazität bedeutend vergrößert, da die Drähte dann gewissermaßen mit dem Boden einen Kondensator bilden. Solche große Kapazitäten wendet man vorzugsweise bei festen Stationen an, die mit sehr langen Wellen operieren.

Fig. 659.



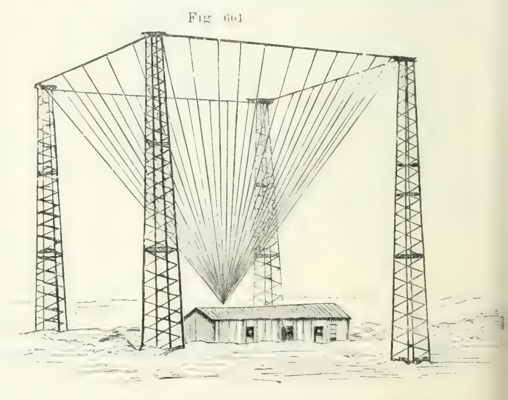
Die Antennen unterscheidet man nach ihrer Form in T-Antennen und Schirmantennen. Die Fig. 659

bis 661 geben einige derartige Luftleiter. So zeigt Fig. 660 eine T-Antenne, Fig. 661 eine Trichterantenne, wie sie bei sehr großen Stationen benutzt wird.

Die Kapazität der Antennen bei der oben angeführten 1,5 Kilowattstation beträgt 500 bis 1000 cm. Um die Wellenlänge der Antenne zu ändern und sie der Wellenlänge im Erregerkreis gleich zu machen, wird auch in die Antenne eine Selbstinduktion eingeschaltet, d. h. eine oder mehrere Rollen mit Drähten, die man hier Verlängerungsspulen nennt. Durch Einschalten eines Amperemeters (für Wechselstrom) in die Antenne kann man erkennen, wann die richtige Resonanzabstimmung erreicht ist. Dann ist nämlich die Stromstärke in der Antenne am größten.


Fig. 660.

An der Empfangsstation werden die Detektoren mit ihrem Telephon meistens induktiv mit der Empfangsantenne gekoppelt. Für den elektrolytischen Detektor gibt Fig. 662 ein Schema. Der Empfangsdraht enthält eine primäre Spule P, an welcher ein Kontakt a verschoben werden kann, der dann durch einen variablen Kondensator V zur Erde führt. Von der primären Spule P wird eine sekundäre S induziert, die mit dem Detektor D, einem Trockenelement E und einem Telephon T verbunden ist, während parallel zum Telephon ein Kondensator C geschaltet ist. Durch V und a kann man die Empfangsantenne abstimmen auf die Wellenlänge der ankommenden Wellen. Dagegen wird der eigentliche Detektorkreis häufig, wie in der eben besprochenen Schaltung nicht besonders abgestimmt, er ist aperiodisch. Nur die Koppelung zwischen Antenne und Detektorkreis, also der Transformator PS wird variabel eingerichtet. Dieser Empfangstransformator hat jetzt die Form der Fig. 663. Eine äußere Drahtrolle T kann gegen eine innere Drahtrolle R gedreht werden, wodurch die gegenseitige Induktion, also die Koppelung verändert wird. Der variable Kondensator wird durch einen Drehkondensator C gebildet,


Fig. 661.

wie wir ihn schon auf S. 30 beschrieben haben. Durch die Einführung der wenig gedämpften, fast ungedämpften Schwingungen läßt sich die Empfangsantenne so scharf auf die ausgesendeten Wellen abstimmen, daß die ankommenden Wellenzüge den Detektor und damit das Telephon genügend anregen und man hört im Telephon die Wellenzüge, deren jeder aus vielen Impulsen besteht, durch einen musikalischen Ton.

Fig. 662.

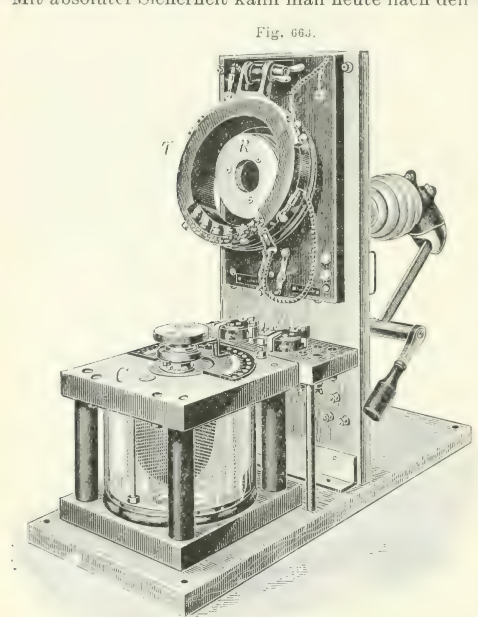
Eine notwendige Forderung für die Praxis der Funkentelegraphie ist aber noch die, daß der Empfänger am Anfang ein Signal erhalten muß, durch welches er aufmerksam gemacht wird, daß er angesprochen wird. Dies läßt sich bei dem Telephonempfang, wie er jetzt eingeführt ist, nicht ohne weiteres machen. Aber, da ja die Kontaktdetektoren addierende Instrumente sind, so hat man sich damit geholfen, daß zum Anruf von der Sendestation eine 10 Sekunden hindurch währende Funkenfolge gesendet wird. Dann genügen diese vielen ankommenden Ströme im Detektor, indem sie sich addieren, um den Zeiger eines Deprezgalvanometers zum Ausschlag zu bringen und durch dessen Bewegung läßt sich eine Batterie schließen, die eine Weckerglocke in Tätigkeit setzt. Der dann hinzueilende Telegraphist schaltet nun statt des Deprezgalvanometers sein Telephon ein und der Empfang kann beginnen.

Wenn wir kurz die Hauptprinzipien der Entwickelung der drahtlosen Telegraphie zusammenfassen wollen, wie sie sich aus den einfachen Hertzschen Versuchen entwickelt hat, so sind diese folgende: 1. die Anwendung der ausstrahlenden Antennen, 2. die Erzeugung der Wellen von großer Länge (100 bis 3000 m) in Flaschenkreisen, 3. Koppelung der Antennen sowohl mit dem Flaschenkreis wie mit dem Empfangsapparat, 4. Abstimmung (Resonanz) aller Teile der Sende- und Empfangsstation aufeinander, 5. Anwendung addierender Detektoren (Kontaktdetektoren), 6. möglichste Steigerung der ausgestrahlten Energie, 7. Veränderlichkeit der zu benutzenden Wellenlänge an der Sendestation und bequeme Abstimmung der Empfangsapparate auf jede ankommende Welle, 8. Anwendung möglichst wenig gedämpfter Wellen durch Stoßerregung.

Die drahtlose Telegraphie kann natürlich mit der gewöhnlichen Telegraphie auf Drähten unter normalen Umständen nicht konkurrieren und will es auch nicht. Sie bietet aber eine willkommene Ergänzung

derselben immer da, wo eine Drahtverbindung zwischen zwei Stationen nicht oder nicht leicht auszuführen ist. Ihre hauptsächlichste Verwendung hat sie bisher gefunden zur Verbindung von Schiffen mit dem Festland und von Schiffen untereinander. Die Antennen werden dabei an den Schiffsmasten befestigt, am Land häufig an Leuchttürmen aufgezogen. Mit absoluter Sicherheit kann man heute nach den verschiedenen Systemen auch mit einfachen Apparaten auf 300 bis 600 km Entfernung telegraphieren. Aber dies ist bei weitem nicht die erreichbare und erreichte Grenze, vielmehr hängt diese ab von der Größe der Stationen und der Menge der Energie, die in Strahlung verwandelt wird. Die größte deutsche Station ist die in Nauen bei Berlin, welche von der Gesellschaft für drahtlose Telegraphie eingerichtet wurde. Die Antenneneinrichtung derselben ist eine riesige und wird durch Fig. 664 dargestellt. Der mittlere Teil derselben stellt einen dreieckigen Turm von 100 m Höhe und 4 m Seitenlänge aus Eisenkonstruktion dar, der durch im Inneren vorhandene Treppen besteigbar ist. Von dem Turm aus verbreitet sich die Schirmantenne, die eine Fläche von etwa 60 000 qm enthält. Die Dimensionen der Apparate im Inneren sind durch die Benutzung des Systems der tönenden Funken nicht mehr so riesig, wie sie früher waren, aber immer noch groß genug. Die Leydenerflaschenbatterie, die früher, vor Einführung des Systems der tönenden Funken, aus 360 großen Flaschen bestand, von denen jede fast Mannshöhe besitzt, wird jetzt nur aus 36 solcher Flaschen gebildet, die aber 1000mal in der Sekunde aufgeladen werden. Der Antenne werden 32 000 Watt Schwingungsenergie zugeführt. Mittels dieser Station gelingt es jetzt über Land auf 4000 km und über Wasser sogar auf 5000 km nach den Dampfern zu telegraphieren, wobei aber die Grenze noch nicht erreicht ist. Die allergrößten Erfolge hat aber immer noch Marconi erzielt, der mit seltener Umsicht, Geschicklichkeit und Erfindungsgabe eine große Anzahl von Neuerungen

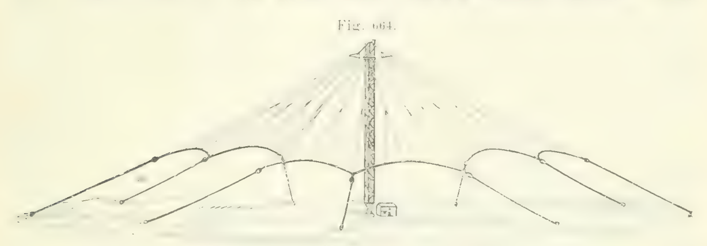
Fig. 663.



von Bedeutung und Wert zuerst in diese Technik eingeführt hat und dem auch die Riesenleistung gelungen ist, zwischen England und Amerika einen regelmäßigen drahtlosen Depeschenverkehr einzurichten.

Bei diesen großen Entfernungen, bei welchen die Krümmung der Erdkugel bereits kilometerhohe Hindernisse zwischen den beiden Stationen hervorbringt, tritt die Frage auf, ob denn wirklich die elektrischen Wellen durch den Luftraum von der einen zur anderen Station gelangen. Es ist das von vornherein sehr unwahrscheinlich. In Wirklichkeit breiten sich die Wellen zum großen Teil längs der Oberfläche der Erde aus. Daraus läßt sich auch die Tat-

Fig. 664.

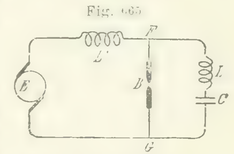


sache erklären, daß die drahtlose Telegraphie über der Meeresoberfläche auf viel weitere Entfernungen möglich ist, als über Land. Das Wasser des Meeres leitet eben die elektrischen Wellen besser weiter, wie das Gestein des Erdbodens.

Es ist staunenswert, wie sich die neue Technik bis zu solchen Leistungen erheben konnte, obwohl in dem Funken selbst, auf dem die ganze Methode beruht, ein im allgemeinen launenhaftes und exakter Technik scheinbar widersprechendes Element enthalten ist. Daher waren dauernd auch die Bestrebungen der Techniker darauf gerichtet, andere Methoden zu ersinnen, durch welche man so rasch wechselnde elektrische Bewegungen erhalten könne, ohne mit den unzuverlässigen Funken arbeiten zu müssen, die noch dazu den Übelstand besitzen, nur gedämpfte Schwingungen auszusenden.

Aber wie das machen? Der erfindungsreiche dänische Forscher Poulsen, dem auch das Telegraphon zu verdanken ist (oben S. 679), hat eine eigentümliche Methode zur Erzeugung rascher ungedämpfter Schwingungen angegeben, eine Methode, die auf dem Prinzip der tönenden Bogenlampe (oben S. 681) beruht. Wenn man, wie in Fig. 665 parallel zu einem Lichtbogen B, der mit Gleichstrom von einer Stromquelle E gespeist wird, eine Kapazität C und eine Selbstinduktion L anbringt, so findet man, daß der Lichtbogen tönt und daß in diesem parallelen Kreis ein Wechselstrom von der Periode dieser Töne fließt. Die Schwingungszahl dieses Wechselstroms wird nun aber, wie Poulsen fand, bedeutend höher, wenn der Lichtbogen nicht in Luft, sondern in Wasserstoff oder in einem wasserstoffhaltigen Gas brennt und wenn er in einem Magnetfeld sich befindet. Man

Fig. 665.



erhält dann Wechselströme, die eine Schwingungszahl (Frequenz) von 200 000 bis 300 000 besitzen und die daher Wellenlängen in Leitern und in der Luft ergeben, deren Größe 1000 bis 1600 m ist, also Wellenlängen von einer Größe, wie sie für die drahtlose Telegraphie schon angewendet werden. Diese Schwingungen sind ungedämpfte, weil fortwährend in jedem Moment ein Teil der Gleichstromenergie des Lichtbogens sich in Wechselstrom verwandelt. Der Grund zum Entstehen dieser Wechselströme besteht vermutlich darin, daß das magnetische Feld immer den Lichtbogen abzureißen, also den Strom zu unterbrechen sucht, die äußere Spannung aber ihn aufrecht zu erhalten sucht. Falls die beiden Kräfte nahezu gleich sind, so findet ein periodisches Überwiegen der einen Kraft über die andere statt, das in um so rascherer Folge vor sich geht, je mehr das magnetische Abreißen des Lichtbogens noch durch andere Einflüsse, wie es das Abkühlen des Lichtbogens durch die Wasserstoffumgebung ist, gefördert wird.

Indem man nun solche ungedämpfte Schwingungen in einem Kreise erzeugt, kann man ganz ebenso wie bei der eigentlichen Funkentelegraphie ein zweites System, nämlich die Antenne, mit diesem koppeln und zwar direkt oder indirekt, eng oder lose, und erhält nun die den Äther durcheilenden Wellen ganz so wie früher.

Die großen Erwartungen jedoch, die man vor wenigen Jahren von dieser neuen Methode der drahtlosen Telegraphie hegte, haben sich nicht erfüllt. Die so erzeugten ungedämpften Schwingungen lassen sich nicht so regelmäßig herstellen, daß alle Schwingungen dieselbe Intensität besitzen. Es finden Schwankungen der Intensität statt, die für die Abstimmung ebenso schädlich sind, wie die Dämpfung. Deswegen leistet die Methode nicht mehr als die Funkenmethode und besitzt auch gewisse Nachteile dieser gegenüber.

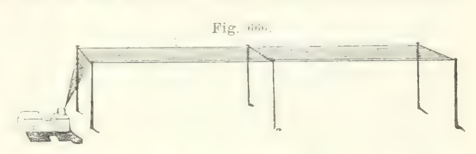
Die Erzeugung ungedämpfter oder wenig gedämpfter Schwingungen in einer für den praktischen Betrieb geeigneten Weise, ohne störende Nebenerscheinungen, blieb also auch nach Poulsens Erfindung zunächst noch ein idealer Wunsch.

Dagegen hat sie es ermöglicht, drahtlos auf gewisse Entfernungen telephonische Gespräche durch den Äther zu übermitteln. Wenn man nämlich bei solchen ungedämpften Schwingungen in die Sendeantenne ein Mikrophon einschaltet und in dasselbe spricht, so wird ja durch das Sprechen der Widerstand des Mikrophons in bestimmter periodischer Weise geändert. Daher wird auch die Dämpfung der Schwingungen in der Antenne in derselben Weise geändert und damit zugleich die Stärke der ausgestrahlten Schwingungen. Je nach den in das Mikrophon hineingesprochenen Tönen gehen also von der Sendeantenne Schwingungen variabler Stärke aus, die, an der Empfangsstation ankommend, ein dortiges Telephon zur Wiedergabe der Töne veranlassen. In der Tat ist es so gelungen, bis zu 500 km eine drahtlose Telephonie einzurichten. Indes kann man zunächst diesen Versuchen eine praktische Bedeutung nicht zusprechen, muß sie vielmehr für eine Art Spielerei erklären. Denn während der Vorzug der Telephonie eben in der unmittelbaren Verständigung zweier Personen besteht, die mit einfachen Apparaten ausgerüstet sind, gehören zur drahtlosen Telephonie zwei vollständige funkentele-

graphische Stationen mit großen und komplizierten Einrichtungen, die eine dauernde und sachverständige Bedienung erfordern. Sind solche Stationen eingerichtet, dann kann allerdings jeder, der sich an dieser Station befindet, ohne spezielle Sachkenntnis telephonisch in die Ferne sprechen. Aber als ein Ersatz oder eine gleichwertige Konkurrenz für die gewöhnliche Telephonie ist das nie und nimmer anzusehen.

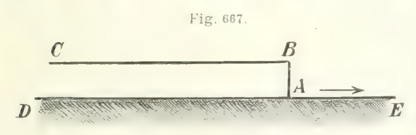
Das vorteilhafteste Mittel, um den Funken aus der drahtlosen Telegraphie zu beseitigen, wäre gefunden, wenn es gelänge, Wechselstrommaschinen mit so hoher Frequenz zu bauen, wie sie die drahtlose Telegraphie braucht, also mit 30 000 bis 100 000 Perioden in der Sekunde. Es ist aus Konstruktionsgründen nicht daran zu denken, das mit gewöhnlichen Wechselstrommaschinen zu erreichen, indem man die Zahl ihrer Pole und ihre Geschwindigkeit erhöht. In jüngster Zeit scheint aber durch eine ingeniöse Einrichtung, die von Goldschmidt herrührt, der Weg zu diesem wichtigen Fortschritt in der drahtlosen Telegraphie gebahnt zu sein. Doch unterliegt diese neue Anordnung noch dem Versuch.

Fig. 666.



Eine äußerst wichtige Aufgabe der neuen Technik besteht darin, die Richtungen, in welchen die elektrischen Wellen durch den Raum eilen, möglichst einzuschränken, so daß sie von der Sendestation aus nicht nach allen Seiten, sondern vorzugsweise nach einer Richtung hin fortschreiten. Zur Bewältigung dieser Aufgabe sind viele Anstrengungen aufgewendet worden und das Problem ist, wenn auch nicht vollständig, so doch in gewissem Grade gelöst worden. Wieder war es Marconi, der zuerst Anordnungen in die Praxis einführte, welche eine, wie man es nennt, gerichtete Telegraphie wenigstens zum Teil ermöglichen. Das einfache Mittel dazu besteht darin, daß an der Sendestation die Antenne nicht vertikal gestellt wird, sondern größtenteils horizontal. Die Antennen bei der transatlantischen Telegraphie von Marconi haben die Form, wie sie durch Fig. 666 dargestellt wird. Die Wirkung eines solchen horizontalen Senders A B C (Fig. 667) ist größer in der Richtung A E, als in der Richtung A D. Es beruht das darauf, daß eben die Wellen zum Teil im Boden verlaufen, daß der Boden aber keine sehr vollkommene Leitfähigkeit besitzt. Deswegen krümmen sich die von dem Sender ausgehenden elektrischen Strahlen, und diese Krümmung wird durch die angegebene Form des Senders so gestaltet, daß sie in der Richtung A E zur Erdoberfläche hin, in der entgegengesetzten Richtung von der Erdoberfläche weg zeigt, so daß die Strahlung in der ersten Richtung wirksamer ist. Dieselbe Antenne, als Empfangsantenne benutzt, spricht am besten an auf Wellen, die aus der Richtung B C ankommen, weniger auf solche, die aus irgend einer anderen Richtung ankommen.

Fig. 667.



Welche enorme Bedeutung die drahtlose Telegraphie im Kriege erlangen kann, dafür hat der japanisch-russische Krieg Beweise in Fülle geliefert. Ebenso hat sie erhebliche Erfolge bei Landmanövern in der Verbindung der einzelnen Truppenteile miteinander, mit dem Hauptquartier und mit Festungen zu erzielen vermocht. Bei den deutschen Manövern hat sich die Brauchbarkeit der drahtlosen Telegraphie für diese Zwecke vollkommen erwiesen. Es werden natürlich zu dem Zweck die Stationen mit allen notwendigen Apparaten zum Geben und Empfangen der Zeichen fahrbar gemacht. Die Antennen werden dabei gewöhnlich durch Fesselballons in die Höhe gezogen. Versuche, zwischen dem Lande und einem Berggipfel, oder zwischen Berghütten untereinander zu telegraphieren, sind bisher nur in geringer Zahl mit gutem Erfolge vorgenommen worden. Auch zwischen der Erde und dem Zeppelinschen Ballon zu telegraphieren, ist mit befriedigendem Erfolg gelungen. Nachdem Marconi einen regelmäßigen funkentelegraphischen Verkehr zwischen Europa und Amerika eingerichtet hat und dadurch der submarinen Telegraphie eine erhebliche Konkurrenz gemacht hat, ist die Leistungsfähigkeit dieses neuen Zweiges der Technik in großartigster Weise bewiesen.

Die drahtlose Telegraphie hat nur den einen schweren Nachteil vor der gewöhnlichen, daß es ein Depeschengeheimnis bei ihr nicht gibt. Jeder, der in dem Ausstrahlungsbereich des Senders sich befindet, kann durch einen genügend empfindlichen Empfangsapparat die Depeschen abfangen. Man sieht auch nicht wohl ein, wie dem völlig abzuhelfen wäre, da eben die telegraphischen Zeichen nicht an die Drähte gebunden, sondern frei im Raume vorhanden sind. Insofern ist allerdings nicht daran zu denken, daß je die gewöhnliche Telegraphie durch die Funkentelegraphie vollständig verdrängt werden wird. Die Station in Nauen z. B. kann alle Telegramme aufnehmen, die von der Marconistation in England an Schiffe abgesendet werden, und ebenso auch umgekehrt. Gegen dieses Abfangen der Telegramme kann man sich nicht schützen, sondern man ist, wenn es sich um geheime Nachrichten handelt, gezwungen, mit Geheimschriften zu operieren.

Wir sind am Schlusse unserer Betrachtungen angelangt. Wir haben gesehen, wie in den verschiedensten Gebieten die Elektrizität allmählich in den Dienst der Menschheit gezwungen worden ist. Sie beleuchtet unsere Städte und Wohnungen, sie treibt unsere Maschinen, sie schleppt unsere Bahnen, sie reinigt unsere Kleider, sie kocht unsere Speisen und heizt unsere Zimmer, sie übermittelt unsere Gedanken und Worte in die Ferne, sie erlaubt uns, in das Innere des Körpers zu schauen, im kleinen und im großen spüren wir überall die segensreichen Wirkungen dieser gewaltigen Naturkraft und wir dürfen zum Schluß sagen, da nur durch eifriges Studium der Natur alle diese Anwendungen möglich geworden sind, daß die vorurteilsfreie Erforschung der Natur uns Kräfte gibt und Einrichtungen zu schaffen gestattet, die früher nur für erstrebenswerte, aber unerreichbare Gebilde weitschweifender Phantasie galten.

Register.

A.

B.

I.

J.

K.

T.

U.

V.

W.

Z.

